



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

PETRI AHOMÄKI
TOLERANSSIEN ANALYSOINTI JA DIMENSIONMITTAUS
OSAVALMISTUKSESSA
Diplomityö

Tarkastaja: professori Heikki Tikka
Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Automaatio-, kone- ja
materiaalitekniikan
tiedekuntaneuvoston kokouksessa
7.3.2012

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Konetekniikan koulutusohjelma

AHOMÄKI, PETRI: Toleranssien analysointi ja dimensiomittaus osavalmistuksessa

Diplomityö, 80 sivua, 15 liitesivua

Joulukuu 2011

Pääaine: Tuotantotekniikka

Tarkastaja: professori Heikki Tikka

Avainsanat: Mittaus, osavalmistus, RR-testi, koordinaattimittaus, geometriatoleranssit, toleranssien kriittisyyden analysointi

Tämä diplomityö on tehty Rolls-Royce Oy Ab:n Rauman tehtaan osavalmistukselle. Työn tavoitteena oli arvioida Rolls-Royce Oy Ab:n potkurilaitteiden ylä- ja alarunkojen sekä akseleiden mitta- ja geometriatoleranssien kriittisyyttä laitteen toiminnan kannalta sekä kehittää kappaleiden mittausta. Toleranssin kriittisyys muodostuu toleranssialueen ylityksestä aiheutuvien seurausten vakavuudesta laitteen toiminnalle, toleranssin valmistettavuuden ja toleranssin mitattavuuden perusteella. Työn kirjallisuusosuudessa käsitellään mittaustekniikan teoriaa, koordinaattimittausta, pituusmittojen toleranssit ja eri geometriatoleransseja sekä esitellään konepajoissa käytössä olevia mittausräjälineitä.

Toleranssien kriittisyyden analysointi tehtiin FVRA (Feature Verification Risk Analysis) -menetelmän avulla. Analyysissä on kolme arvioitavaa osa-aluetta, jotka ovat elementin mahdollisen virheen aiheuttaman riskin vakavuus, todennäköisyys ja havaitseminen. Tulosten mukaan kriittisiä toleransseja laitteen toiminnan kannalta ovat akselilinjoihin vaikuttavat rungon toleranssit sekä akseleiden laakerin paikkojen mittatoleranssit ja heitot.

Tuotannossa käytössä olevilla käsimittausvälineillä ja uusilla, vertailtavaksi hankituilla, käsimittausvälineillä (mikrometri ja hakatulkki) tehtiin RR-testi (repeatability ja reproducibility). RR-testillä tutkitaan mittausten toistettavuutta ja uusittavuutta. Mittauslaitteen tarkkuuden lisäksi tärkeää oli mittauslaitteiden käytettävyys yksittäistuotannossa. Mikrometrien etuna vertailumittauslaitteisiin nähden (kuten hakatulkki) on, että se antaa mittaus tuloksena mitan todellisen arvon, eikä vertailuarvoa asetettuun mittaan. Käsimittausvälineiden osalta RR-testit osoittivat, että digitaalisilla mikrometreillä, joissa on tarkempi resoluutio, kuin perinteisissä analogisissa mikrometreissä saavutetaan parempi toistettavuus perinteisiin analogisiin mikrometreihin verrattuna. Asetettavalla hakatulkillä saavutettiin mikrometrejä parempi toistettavuus, mutta hakatulkin asettamisen oli ongelmallista yksittäistuotannossa.

Geometriatoleranssien mittausta varten lähetettiin kappaleita koordinaattimittaukseen ulkopuoliselle palveluntarjoajalle. Tulokset kertovat, mikä valmistusprosessin todellinen laaduntuottokyky oli tarkasteluhetkellä. Työssä tutustuttiin laserseuraimeen ja nivelsikoordinaattimittauskoneeseen, jotka ovat liikuteltavia koordinaattimittausjärjestelmiä. Rolls-Royce Oy Ab:n potkurilaitteiden rungot toimivat myös hammasvaihteen kotelona. Tästä syystä rungoille on asetettu useita suhteellisen tiukkoja geometriatoleransseja. Näiden toleranssien mittaaminen vaatii paljon myös koordinaattimittausjärjestelmältä. Vaikka liikuteltavat koordinaattimittausjärjestelmät ovat kehittyneet paljon, ei niiden tarkkuus vastaa parhaita koordinaattimittauskoneita.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Mechanical Engineering

AHOMÄKI, PETRI: Evaluation of tolerances and dimensional measurement in parts manufacturing

Master of Science Thesis, 80 pages, 15 Appendix pages

December 2011

Major: Production Engineering

Examiner: Professor Heikki Tikka

Keywords: measurement, part manufacturing, R&R study, coordinate measuring, geometrical tolerances, criticality evaluation of tolerances

This master's thesis is made for parts manufacturing of Rolls-Royce Oy Ab Rauma plant. The objective for this thesis was to assess the criticality of the tolerances both geometrical tolerances and linear sizes of the shafts and upper and lower gear housings that are manufactured in the plant. The criticality of tolerance consist the effects caused by tolerance nonconformance to the device, producibility and measurability. Additional goal was to develop measuring of those parts. The literature review of this thesis deals with theory of measurement technology as well as geometrical tolerances and different types of measuring equipment.

The evaluation of tolerances was made using a feature verification risk analysis (FVRA). The analysis has three different categories in which the tolerances are reviewed. The categories are the seriousness, probability of the risk and how easily a nonconformance of the tolerance is detected. The results show that critical features are places of the bearings and all other features that effect alignment of the shafts.

Manual measuring equipment was studied using the RR-study (repeatability and reproducibility). In addition to accuracy of the measuring equipment an important factor was usability of the gauge. Because micrometers give you a true value of the measured dimension in comparison to a snap gauge, that gives the result as the difference between the measured dimension and the preset measure. The RR-study showed that digital micrometers whit a 0.001 mm resolution have a better repeatability than an analog one whit a smaller 0.01 mm resolution.

For measuring of geometrical tolerances one upper and two lower gear housings were measured by outside supplier. The results gave information about the capability of the manufacturing process. During this master's thesis we also assessed laser tracker and articulated arm type CMM for measuring the gear housings.

Rolls-Royce Oy Ab's Azimuth thruster's body is also the gear housing for gearing. That is why tight tolerances are required in the housings. Measuring these tolerances requires very precise coordinate measuring system. While laser trackers and articulated arm type CMM's have developed and become more accurate over time. They still can not achieve the accuracy of the best coordinate measuring machines.

ALKUSANAT

Tämä Diplomityö on tehty Rolls-Royce Oy Ab:n Rauman tehtaan osavalmistukselle. Työn tarkoitus oli selvittää vaadittujen toleranssien kriittisyyttä ja kehittää niiden mittausta osavalmistuksessa.

Haluan kiittää koko Rolls-Royce Oy Ab:n Rauman osavalmistuksen henkilöstöä ja erityisesti työn ohjaajia. Kiitokset myös työn ohjaajana ja tarkastajana toimineelle professori Heikki Tikalle.

Kiitos työn oikolukeneelle Meiju Ahomäelle.

Rauma 20.3.2012

Petri Ahomäki

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
1.1	Rolls-Royce.....	1
1.2	Työn tausta	2
1.3	Työn tavoitteet	2
1.4	Työn sisältö	2
2	Mittaustekniikka.....	3
2.1	Käsitteitä	3
2.2	Mittausvirheet	3
2.2.1	Systemaattinen virhe.....	4
2.2.2	Satunnaisvirhe.....	5
2.2.3	Karkea virhe.....	5
2.3	Mittauksen virhelähteet.....	6
2.3.1	Lämpötilasta aiheutuvat virheet.....	6
2.3.2	Voimien aiheuttamat virheet.....	7
2.3.3	Asentovirheet.....	8
2.3.4	Jako virhelähteen mukaan.....	9
2.4	Mittausepävarmuus	10
2.4.1	Kokeellinen määrittäminen.....	12
2.4.2	Laskennallinen määrittäminen.....	14
2.5	Kalibrointi	16
2.5.1	Kalibrointi- ja mittausolosuhteet	18
2.5.2	Kalibrointijakso	18
2.6	Mittaaminen	19
2.7	Mittauslaitteet.....	20
2.7.1	Mikrometrit.....	20
2.7.2	Työntömitat.....	22
2.7.3	Mittapalat.....	23
2.7.4	Tulkit.....	24
2.7.5	Hakatulkki.....	25
2.7.6	Mittakellot.....	26
2.8	Koordinaattimittaus.....	27
2.8.1	Koordinaattimittauskonetyypit	28
2.8.2	Mittauspää	28
2.8.3	Laserseurain.....	29
2.8.4	Mittauskyky	30
3	Toleranssit.....	32
3.1	Käsitteitä	32
3.2	Toleranssien välinen riippuvuus	32
3.3	Pituusmittojen toleranssit.....	35
3.4	Geometriatoleranssit	35

3.4.1	Toleranssialueiden määritelmää	37
4	Toleranssien analysointi	42
4.1	FVRA-menetelmä	42
4.2	Tulokset	43
4.2.1	Potkuriakseli	43
4.2.2	Ylärunko	44
4.2.3	Alarunko	46
5	Osavalmistus ja nykyiset mittausmenetelmät	48
5.1	Mittausvälineet	50
5.2	Mitattavat elementit	52
5.2.1	Akselivalmistus	52
5.2.2	Runkojen valmistus	52
6	Mittauskokeet	54
6.1	Käsimittausvälineet	54
6.2	Koordinaattimittaus	56
7	Tulokset ja niiden tarkastelu	58
7.1	Ulkopuoliset halkaisijat	58
7.2	Sisäpuoliset halkaisijat	61
7.3	Koordinaattimittaukset	64
7.3.1	Akselit	64
7.3.2	Ylärunko	66
7.3.3	Alarungot	67
7.4	Laserseurain	69
7.5	Nivelvarsikoordinaattimittauskone	70
8	Johtopäätökset	73
9	Suosituksat	75
	Lähteet	78
	Liite 1	81
	Liite 2	85
	Liite 3	88
	Liite 4	89
	Liite 5	92
	Liite 6	93
	Liite 7	94

TERMIT JA NIIDEN MÄÄRITELMÄT

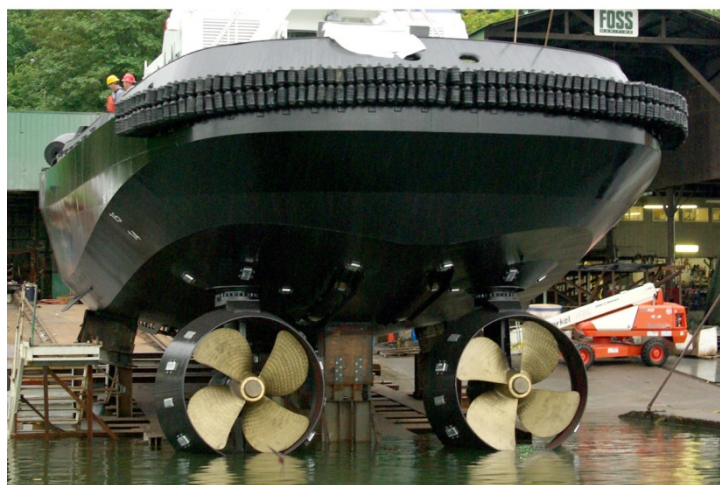
mm	10^{-3} metriä
μm	10^{-6} metriä
N	Newton ($\text{kg} \cdot \text{m/s}^2$)
FVRA	Feature Verification Risk Analysis
GPS	Geometric Product Specification
	Geometrinen tuotemäärittely
Invarteräs	Teräs, johon on seostettu (36 % nikkeliä), jolloin sen lämpöpiteneumiskerroin on hyvin pieni
Kääntömoottori	Hydrauli- tai sähkömoottori joka kääntää potkurilaitetta
Laakerin paikka	Kohta rungossa tai akselissa, johon laakeri tai laakeripesä kiinnittyy
Menoraja	Mittaelementin tila, jossa se on siinä rajamitassa, missä sen materiaali on maksimissaan
Metrologia	Tieteenala, joka käsittelee mittaamista
Mittaelementti	Geometrinen muoto, jonka määrittelee pituus- ja kulmamitta
Mittanormaali	Mittanormaalilla määritellään tai säilytetään suureen mittayksikkö
Mittausepävarmuus	Arvo, joka kuvaa mittaussuureen arvojen todennäköistä vaihtelua
Mittaussuure	Mittauksen kohteena oleva suure
Mittaustulos	Mittaamalla saatu suureen arvo
Mittausvirhe	Mittaustuloksen ja tosiarvon erotus
Mittayksikkö	Suureen arvo, jonka lukuarvo on 1
NC	Numerical Control
NVKMK	Nivelvarsikoordinaattimittauskone
Risteily	Akselilinjoiden sijaintitoleranssi, käytetään usein tietyssä suunnassa
Suure	Suure voidaan tunnistaa laadultaan ja mitata määrältään
SPC	Statistical Process Control
	Tilastollinen laadunohjaus

1 JOHDANTO

1.1 Rolls-Royce

Rolls-Royce on maailmanlaajuinen yritys, joka toimii viidellä toimialalla. Toimialoja ovat siviili- ja sotilaslentokoneollisuus, meriteollisuus, energia sekä ydinvoima. Meriteollisuuden toimialalla toimivan Rolls-Royce Marinen, johon myös Rolls-Royce Oy Ab kuuluu, liikevaihto vuonna 2010 oli noin 2.6 miljardia puntaa ja työntekijöitä noin 9000 maailmanlaajuisesti. Se on Rolls-Roycen toiseksi suurin toimiala siviililentokoneollisuuden jälkeen. Suomessa toimivalla Rolls-Royce Oy Ab:lla on meriteollisuuden suunnittelua, valmistusta ja myyntiä. Rolls-Royce Oy Ab:n tehtaat ovat Raumalla ja Kokkolassa, joissa yhteensä yli 400 työntekijää. Kokkolassa valmistetaan ja suunnitellaan vesisuihkuvetolaitteita. Raumalla sekä suunnitellaan että valmistetaan potkurilaitteita ja suunnitellaan kansikoneita kuten vinttureita. [1]

Rauman tehtaan päätuote on ympärikkääntyvät Azimuth-potkurilaitteet. Niiden tehoalueet ovat 280 - 7500 kilowattia. Laitteita käytetään hinaajissa, maantielautoissa, erilaisissa huoltoaluksissa, öljynporauslautoissa ja -laivoissa sekä jäänmurtaajissa. Kääntyvät potkurit sekä liikuttavat että ohjaavat alusta eikä erillistä peräsintä tarvita. Azimuth-potkurilaitteilla saavutetaan suuri paaluveto sekä eteen että taakse. Alus voi liikkua myös sivuttaisesti tai kääntyä paikoillaan [2]. Suomalaisissa monitoimimurtaajissa MSV Nordica ja MSV Fennica on Azimuth-potkurilaitteet, jotka mahdollistavat alusten monipuolisen käytön sekä jäänmurtamiseen että työskentelyyn öljykentillä. [3] Kuvassa 1.1 hinaajaan asennetut Rolls-Royce Azimuth-potkurilaitteet.



Kuva 1.1 Rolls-royce Azimuth-potkurilaitteet hinaajassa. [2]

1.2 Työn tausta

Tämä diplomityö on tehty Rolls-Royce Oy Ab:n meriteollisuuden potkurilaitteita valmistavan Rauman tehtaan osavalmistukselle. Rauman tehtaalla kokoonpannaan potkurilaitteita ja valmistetaan akseleita ja runkoja. Akseleilta ja rungoilta vaaditaan tiukkoja mitta- ja geometriatoleransseja. Suurien akselien ja runkojen mittaaminen on vaikeaa ja varsinkin geometriatoleranssien tarkastaminen on konepajateollisuudessa usein vielä varsin uusi asia. Rolls-Royce Oy Ab haluaa kehittää omaa mittaustaan, jotta se voi tarjota asiakkaille yhä parempia tuotteita.

Mittaus ei nykyään ole vain tapa tarkastaa valmistettu kappale ja joko hyväksyä tai hylätä se. Mittaustuloksia voidaan käyttää myös prosessinohjaukseen ja tarkkailla valmistusprosessia sekä hyödyntää tuotesuunnittelussa.

1.3 Työn tavoitteet

Tämän diplomityön tavoite on kehittää mittausmenetelmiä Rolls-Royce Oy Ab:n Rauman osavalmistuksessa, jotta kriittisiksi arvioidut mitat voidaan mitata ja näin varmistua kappaleen laadusta. Yhteistyössä suunnittelun ja valmistuksen välillä arvioidaan kappaleiden toleransseja ja niiden kriittisyyttä sekä toleranssivaatimusten sopivuutta kohteeseen. Toleranssin kriittisyys muodostuu toleranssialueen ylityksestä aiheutuvien seurausten vakavuuden, toleranssin valmistettavuuden ja toleranssin mitattavuuden perusteella. Tämän työn kuluessa ei ehditty tehdä suuria muutoksia, joten työn tavoite on ollut kartoittaa nykytilannetta sekä kehittää toimintamallia tulevaisuutta varten.

1.4 Työn sisältö

Työn alussa kirjallisuusuudessa käsitellään mittaustekniikan teoriaa, koordinaattimittausta, käydään läpi pituusmittojen toleranssit ja geometriatoleransseja sekä esitellään konepajoissa käytössä olevia mittausräjälineitä. Lisäksi esitellään myös feature verification risk analysis (FVRA) -menetelmä, jota käytetään toleranssien kriittisyyden analysointiin. Menetelmä on eräänlainen muunneltu Failure Mode Effects Analysis.

Työn loppupuolella käsitellään FVRA-työstä saatuja tuloksia, käydään läpi eri mittausräjälineillä tehdyt RR-testit, koordinaattimittauksesta saadut tulokset ja kokemukset eri koordinaattimittausjärjestelmistä. Lopuksi on vielä saatujen tulosten ja kerätyn tiedon pohjalta laaditut suositukset, miten mittausmenetelmiä voitaisiin kehittää tulevaisuudessa Rolls-Royce Oy Ab:n Rauman tehtaalla.

2 MITTAUSTEKNIikka

2.1 Käsitteitä

Metrologia on mittauksia käsittelevä tieteen ala. [4, s. 23] Metrologian kohteita ovat suureet, mittayksiköt ja niiden mittanormaalit, mittaukset, mittauslaitteet, mittaustulosten käsittely ja luotettavuudenarviointi ja mittaajan toiminta. [5]

Suure on ominaisuus, joka voidaan tunnistaa laadultaan ja määrältään mitata. [4, s. 20] **Mittaussuure** on mitattavana oleva suure. [4, s. 24] **Mittayksikkö** on sovittu suureen arvo ja johon saman lajin suureita verrataan. [4, s. 21] SI-järjestelmän mukainen pituuden perusyksikkö on metri (tunnus m). Metri on matkan pituus, jonka valo kulkee tyhjiössä ajassa $1/299\,792\,458$ sekuntia. [4, s. 92]

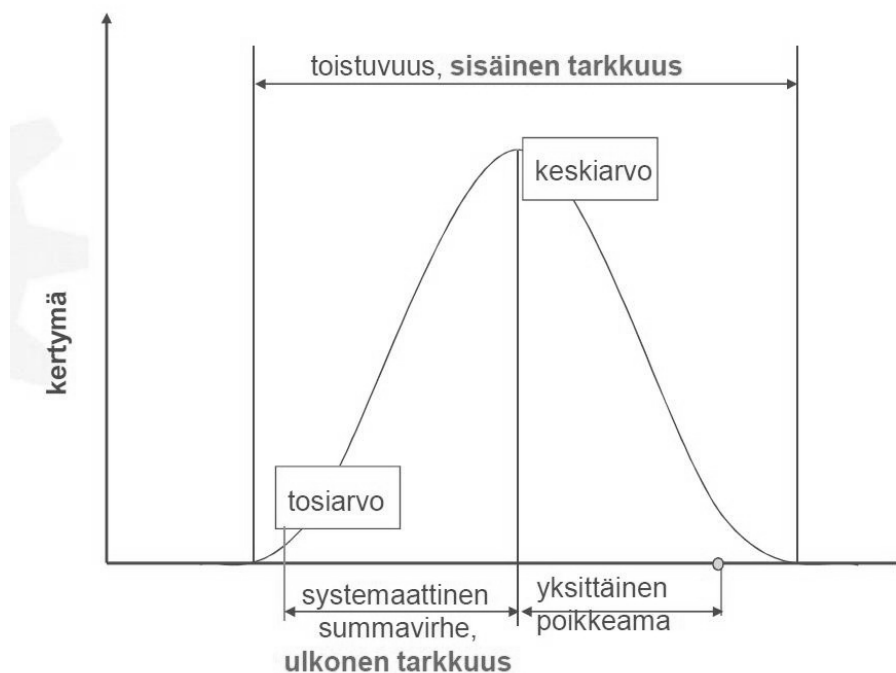
Mittaus on toimintojen sarja, jolla pyritään selvittämään suureen arvo. [4, s. 23] **Mittausmenetelmiä** on suora ja epäsuora mittausmenetelmä, joista suoralla mittausmenetelmällä saadaan mitattava suure välittömästi ja epäsuoralla mittausmenetelmällä mitataan jokin suure, josta mittaussuure on riippuvainen tunnetulla tavalla. Vertailumittauksessa verrataan tunnettua normaalia ja mitattavaa kohdetta toisiinsa ja näiden erotus muodostaa mittaustuloksen. [5]

Mittauksen tarkkuus on mittaustuloksen ja tosiarvon yhteensopivuus. **Mittauksen toistuvuus** tarkoittaa mittaussuureen peräkkäisten mittaustulosten yhtäpitävyyttä. Mittauksen toistuvuuteen kuuluu sama mittausmenettely, havainnoitsija, mittauslaite, paikka ja samat mittausolosuhteet, joissa mittaukset tapahtuvat lyhyen ajan sisällä. **Mittauksen uusittavuus** tarkoittaa mittaustuloksen yhtäpitävyyttä, kun mittaukset suoritetaan eri olosuhteissa. Muuttunut olosuhde voi tarkoittaa eri mittaustapaa tai mittauslaitetta, eri mittaajaa, paikkaa tai aikaa. [4, s. 25]

2.2 Mittausvirheet

Mittausvirhe on mitattavan suureen ja mittaustuloksen erotus. [4, s. 26] Kaikissa mittaustuloksissa on virhettä eikä tulos ole koskaan täysin oikea. Mittausvirhe muodostuu mittauksen eri tekijöistä ja niiden muutoksista mittauksen aikana. Mittaustulos riippuu mittausolosuhteista, mittaajasta, mittauksen kohteesta ja mittauslaitteesta. Mittausvirheet voidaan jakaa perinteisesti systemaattisiin, satunnaisiin ja karkeisiin virheisiin. [5]

Mittaukselle voidaan määrittää sekä sisäinen tarkkuus että ulkoinen tarkkuus. Sisäinen tarkkuus riippuu mittausten hajonnasta, eli mitä mittaustuloksia saadaan mittausta toistettaessa (mittauksen toistettavuus). Ulkoinen tarkkuus riippuu mittausten systemaattisesta virheestä, eli kuinka hyvin mittaustulokset keskittyvät tosiarvon ympärille. Kuvassa 2.2 esitetään, mitä mittausten sisäinen ja ulkoinen tarkkuus tarkoittavat. [6]



Kuva 2.2 Mittausten sisäinen ja ulkoinen tarkkuus. [6]

2.2.1 Systemaattinen virhe

Systemaattinen virhe on mittaustulosten keskiarvon ja mittaussuureen tosiarvon erotus, kun mittauksia suoritetaan ääretön määrä samoissa oloissa. [4, s. 26] Systemaattisen virheen aiheuttavat virhetekijät, joilla on jokin tietty tunnettu suuruus ja suunta. Mitä tarkemmin mittausolosuhteet tunnetaan ja hallitaan, sitä isompi osa mittausvirheistä on systemaattisia. Kun virheen aiheuttajan riippuvuus olosuhteista tunnetaan, virhe voidaan laskea etu- tai jälkikäteen ja korjata mittaustulosta korjauksella, jotta tulos vastaa paremmin tosiarvoa. [6]

Mittaustulokseen vaikuttaa useita systemaattisia virheitä, joista osa on vastakkaissuuntaisia ja näin kumoavat toisensa. Käytettävä korjaus saadaan laskemalla yhteen kaikki systemaattiset virheet ottamalla etumerkit huomioon. Pituuden mittauksessa yleisimmät systemaattiset virheet liittyvät mittauslämpötilaan, mittauslaitteen kalibrointiin ja mittausvoimiin. [6]

Jotta systemaattisia virheitä voidaan korjata matemaattisesti, on poikkeama ja siihen vaikuttavat tekijät tunnettava riittävän hyvin. Näin mitattaessa systemaattisina virheinä

voidaan käsitellä vain virheitä, jotka tunnetaan riittävän hyvin. Muita systemaattisia virheitä on matemaattisesti käsiteltävä satunnaisina virheinä, eikä niille voida tehdä korjauksia. [6] Systemaattinen virhe voidaan joskus määritellä myös kokeellisesti, ellei sille tunneta matemaattisia perusteita. [5]

2.2.2 Satunnaisvirhe

Satunnaisvirhe on yksittäisen mittaustuloksen ja muiden mittaustulosten keskiarvon erotus, jossa keskiarvo muodostuu äärettömästä määrästä mittauksia vakio-olosuhteissa. Koska mittauksia ei ole mahdollista tehdä äärettömästi, voidaan satunnaisvirheelle määrittää vain likiarvo. [4, s. 26]

Satunnaisvirhe on virhe, jonka suuruus ja suunta vaihtelevat satunnaisesti samaa mittausta toistettaessa. Satunnaisvirhettä ei voida korjata matemaattisesti, koska sen virhelähteitä ei tunneta ja pystytä hallitsemaan. [5] Kuitenkin toistamalla mittaus riittävän monta kertaa ja laskemalla mittaustuloksille keskiarvo voidaan satunnaisvirheiden vaikutusta pienentää, yhtälö (1). Samalla voidaan arvioida satunnaisvirheiden suuruusluokka. Tavallisesti valmistettujen kappaleiden mittauksessa satunnaisvirheet jakautuvat normaalijakauman mukaan. [6]

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

Mittaustulosten keskihajonnan estimaatti s saadaan yhtälöstä (2).

$$s = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Myös sellaiset systemaattiset virheet, joita ei tunneta niin hyvin, että niiden korjaus olisi mahdollista, on käsiteltävä satunnaisina virheinä. Mittaustulos sisältää yleensä useita eri satunnaisvirheitä. Todennäköiselle satunnaisvirheelle voidaan laskea arvio laskemalla satunnaisvirheet yhteen neliöllisesti, yhtälö (3). [6]

$$\Delta r = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n r_i^2}{n}} \quad (3)$$

2.2.3 Karkea virhe

Karkeat virheet voivat olla suuruudeltaan moninkertaisia muihin virheisiin nähden. Karkeat virheet aiheutuvat selkeästä virheestä mittauksessa, joka voi johtua huolimattomuudesta tai virheellisestä menettelystä mittauksessa. Mittaaja voi myös lukea mittaustuloksen väärin tai unohtaa ottaa huomioon virhelähteen ja sen korjauksen. [6]

2.3 Mittauksen virhelähteet

Tavallisimpia virhelähteitä mittauksissa ovat lämpötila, mittaukseen liittyvät voimat sekä asento- ja suuntavirheet. Tämän lisäksi mittaustarkkuuteen voivat vaikuttaa kappaleen likaisuus, geometriavirheet ja kappaleen pinnankarheus. Lisäksi kappaleen tai mittauslaitteen magneettisuus voivat häiritä mittauksia. [7]

2.3.1 Lämpötilasta aiheutuvat virheet

Lämpötila aiheuttaa usein suurimmat vaatimukset tarkkoille mittauksille. Kaikki mitat ilmoitetaan +20 °C lämpötilassa. Jos mittauskohde ja -laite ovat tarkalleen +20 °C, ei lämpöpidenemiskertoimia tarvitse huomioida. Käytännössä konepajoissa tilanne ei ole tällainen juuri koskaan. Lisää epävarmuutta aiheuttavat mitattavan kappaleen, mittauslaitteen ja normaalin väliset mahdolliset lämpötilaerot, eri materiaalien erilaiset lämpöpidenemiskertoimet ja kappaleen sisäiset lämpötilaerot. Jotta tarkat korjaukset ovat mahdollisia, on tunnettava sekä kappaleen että mittausvälineen lämpötila ja lämpöpidenemiskerroin (α) sekä eliminoidava sisäiset lämpötilaerot. Taulukossa 2.3.1 esitetään eräiden materiaalien lämpöpidenemiskertoimia. [7]

Taulukko 2.3.1. Materiaalien lämpöpidenemiskertoimia.

Materiaali	α (10^{-6} m/°C)
Alumiini	23,8
Lasi	8
Kovametalli	5...8
Teräs	11,5
Valurauta	10
Ruostumaton teräs	10...18
Kupari	16,5
Invarteräs (36% Ni)	2,6

Kappaleen pituus L_t lämpötilassa t_k °C voidaan laskea yhtälöllä (4). L_{20} on kappaleen pituus 20 °C lämpötilassa ja α_k lämpöpidenemiskerroin. [6]

$$L_t = L_{20} \{1 + \alpha_k(t_k - 20)\} \quad (4)$$

Materiaalien lämpöpidenemiskerroin voi vaihdella riippuen seostuksesta ja valmistusmenetelmästä. Nyrkkisääntönä teräkselle voidaan pitää 1 $\mu\text{m}/100 \text{ mm}/1$ °C. 100 mm pituinen teräskappale pitenee 1 μm lämmitessään yhden asteen. Alumiinin laajeneminen on kaksinkertaista ja ruostumattoman teräksen 1,5 kertaista. Lämpöpidenemiskertoimien luotettavuus on noin 10 % teräkselle. [7]

Lämpötilaeroja voi kappaleeseen syntyä koneistuksessa tai jopa valaistuksesta. Käsistä siirtyy lämpöä mittauslaitteisiin niitä käsiteltäessä. Huomattavimmat lämpötilaerot

syntyvät kappaleisiin, jotka tuodaan ulkovarastosta sisälle. Isoissa kappaleissa voi tällaisissa tapauksissa lämpötilaerojen tasaantumiseen kulua jopa useita vuorokausia. Taulukossa 2.3.2 on esitetty lämpötilantasaantumiseen kuluvia aikoja muutamalle kappaleelle eri alustoilla. [7]

Taulukko 2.3.2. esimerkkejä lämpötilojen tasaantumisaajoista. [7, s. 57]

	Lämpötilanmuutoksen vaatima aika (min)	
	5 °C – 1 °C	1 °C – 0,1 °C
50 mm:n mittapala		
- lappeellaan puupinnalla	40	57
- lappeellaan valurautatasolla	3	4
50kg teräskuutio puupinnalla	600	800
Pintalämpömittari		
- pystyssä puupinnalla	16	82
- lappeellaan valurautapinnalla	1,5	2

Lämpötilaerojen lisäksi mittausvälineiden ja -kappaleiden sisäiset lämpötilaerot voivat vaikuttaa mittaukseen huomattavasti enemmän kuin pituuden lämpötilavaihtelu antaisi ymmärtää. Kaarimikrometrin kaaren tai mittakellon jalan lämmittäminen voi johtaa yllättävän suuriin virheisiin. Lämpötilaerot vaikuttavat erityisesti kohtisuoruus-, suoruus- ja tasomaisuusmittauksiin. [7]

2.3.2 Voimien aiheuttamat virheet

Mittauksessa vaikuttavat voimat ovat yksi mittausvirhelähde. Usein voimien aiheuttamat muutokset ovat laskettavissa, joten virheet voidaan luokitella systemaattisiksi. Ongelma on, ettei mittausvoimia useinkaan tunneta. [6] Yleisimpiä voimien aiheuttamia virhelähteitä ovat kappaleen painosta aiheutuva taipuma, mittausvoiman aiheuttamat muodonmuutokset ja mittauslaitteen muodonmuutos/taipuminen mittausvoiman vaihtelun takia. [7]

Kappaleet muuttavat muotoaan oman painonsa vaikutuksesta. Tämä on tärkeää huomioida ja mitata kappale niin, että muodonmuutokset ovat minimoitu. Tuilla olevan palkin suoruuspoikkeama on pienimmillään silloin, kun palkki on tuettu nk. besselin pisteistä. Tällöin tukipisteet ovat 22 % etäisyydellä palkin päistä palkin pituuteen nähden. Ohutseinämäiset renkaat tulisi mitata vaaka-asennossa. [7] Myös pitkissä akseleissa ja putkissa tapahtuu kappaleen oman painon aiheuttamaa muodonmuutosta. [6]

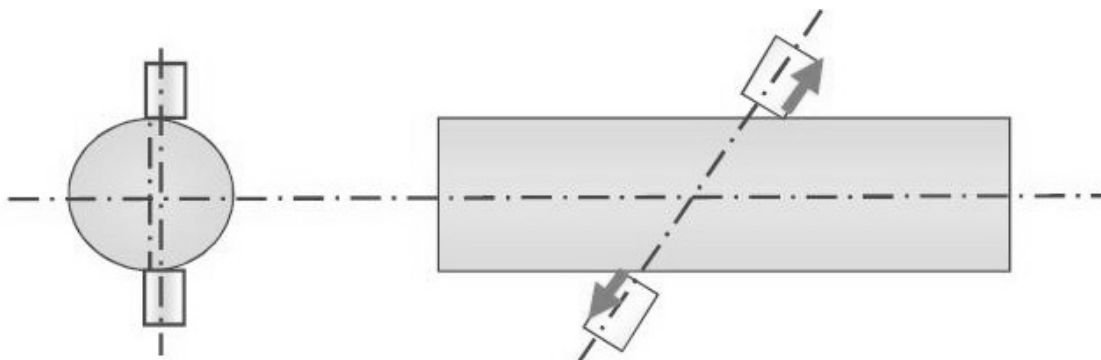
Mittausvoima voi taivuttaa ohuimpia työkappaleita, mutta yleisempää on, että mittausvoima taivuttaa mittauslaitetta. Vaikutus voidaan havaita mm. mittauskärjissä, mittakellon jaloissa ja suurissa kaarimikrometreissä. [7] Mittakellon jalan olisi oltava mahdollisimman tukeva, mutta usein myynnissä on myös jalkoja, jotka eivät ole

riittävän tukevia. Mittakellon tapauksessa tärkeintä on, että mittausvoima pysyisi vakiona, koska voiman muutos aiheuttaa jalassa muodonmuutoksia. Voiman muutos ei yleisesti saisi ylittää 0,6 N. [6]

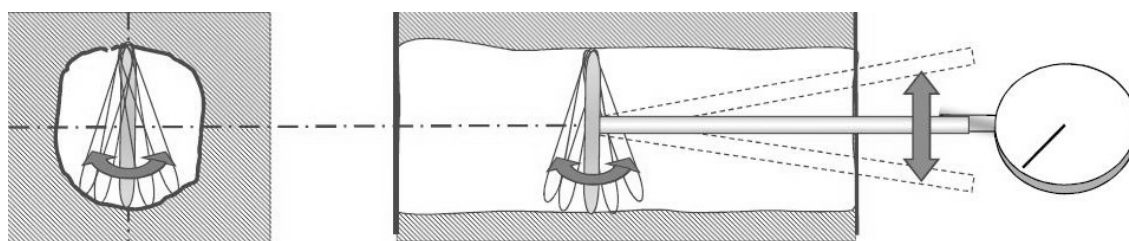
Mittakärki ja mitattava kappale ovat molemmat elastia ja mittausvoima aiheuttaa niissä muodonmuutoksia. Yleisesti vaikutus on mitätön, mutta voi myös olla merkittävä joillakin materiaaleilla. Mikrometrien kaari taipuu mittausvoiman vaikutuksesta, mikä vaikuttaa mittauskärkien etäisyyteen. Tämän takia mikrometreissä on kitkaruuvi, jonka on tarkoitus vakioda mittausvoima. Kitkaruuvikaan ei aina anna täsmälleen samaa voimaa ja kokenut mittaaja saattaa päästä parempiin tuloksiin sormituntumalla. [6]

2.3.3 Asentovirheet

Asentovirheet aiheutuvat työkappaleen ja mittausvälineen välisestä virheellisestä asennosta. Mittaajan huolellisuudella on suuri merkitys, jotta mittaus tapahtuu oikeasta kohtaa ja oikeassa kulmassa. Asentovirheitä ovat kosinivirhe ja mittaus väärästä kohtaa. Kosinivirhe suurentaa halkaisijan mittaustulosta, kuten nähdään oikealla kuvissa 2.3.3 ja 2.3.4. Mittaus väärästä paikasta pienentää halkaisijoiden mittaustulosta, kuten huomataan vasemmalla kuvissa 2.3.3 ja 2.3.4. [7]



Kuva 2.3.3. Asento- ja paikkavirheet ulkopuolisen halkaisijan mittauksessa. [6, s. 137]



Kuva 2.3.4. Asento- ja paikkavirheet sisäpuolisen halkaisijan mittauksessa. [6, s. 137]

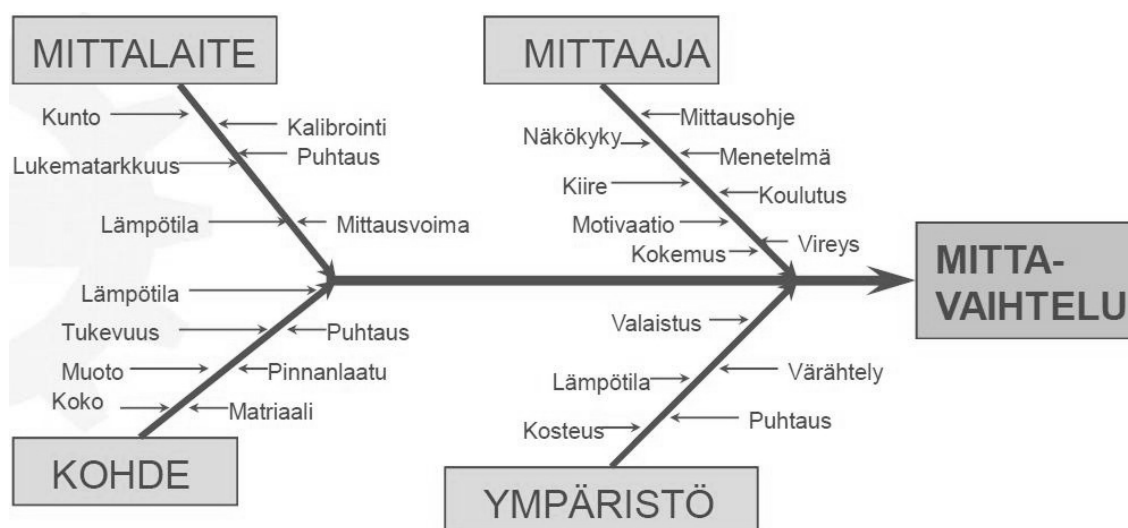
Ulkopuolisen halkaisijan mittauksessa mikrometrillä mittausvoima pyrkii suoristamaan kulmaa kappaleen ja mittauslaitteen välillä. Tasomaisilla mittauskärjillä on myös helpompi löytää oikea mittauskohta. Sisäpuolista halkaisijaa mitattaessa kärjet eivät voi olla tasomaisia, joten oikean kulman löytäminen on huomattavasti vaikeampaa. Samalla täytyy löytää oikea mittauskohta. [6] Kosinivirhe voidaan korjata laskennallisesti

yhtälöllä (5), jossa L oikea mittaustulos, L_m mitattu tulos ja φ niiden välinen kulma, jos tiedetään, kuinka suuri kulma mittaushetken ja mittauslaitteen välillä on. [7]

$$L = L_m / \cos(\varphi) \quad (5)$$

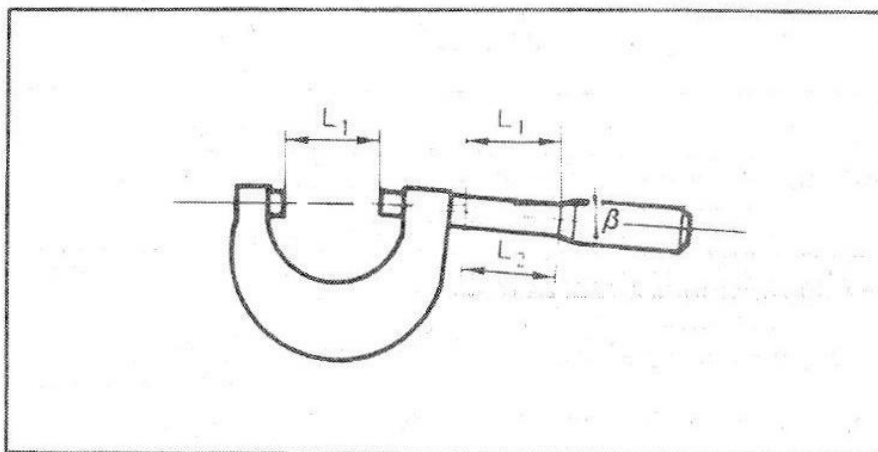
2.3.4 Jako virhelähteen mukaan

Mittauksen virhelähteet voidaan jakaa myös virheen aiheuttajan mukaan. Aiempi jako systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin on perusteltua, jotta voidaan tehdä korjauksia mittaustulokseen. Mittausepävarmuutta määritettäessä on kuitenkin hyvä jakaa virheet niitä aiheuttavien lähteiden mukaan. Näitä ovat mittauksen kohde, mittauslaite, mittaja ja mittausolosuhteet. [6] Kuvasta 2.3.5 selviää, mitkä eri tekijät vaikuttavat mittaustulokseen ja tuloksen vaihteluun.

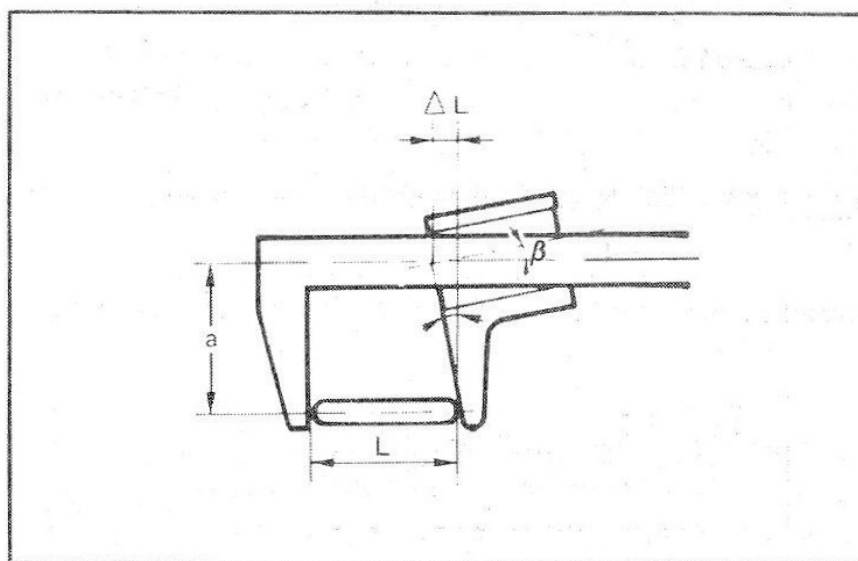


Kuva 2.3.5 Mittausepävarmuuteen vaikuttavat tekijät. [6, s. 139]

Abbén periaatteen mukaan mittaus on järjestettävä niin, että mittauksen kohde ja vertailuasteikko ovat samalla suoralla. Periaatetta noudattamalla johteen suoruusvirheestä aiheutuvat virheet jäävät usein merkityksettömiksi, eivätkä siirry suoraan mittaustulokseen ensimmäisen kertaluvun virheinä. Kaari- ja tikkumikrometri noudattavat tätä periaatetta, kuva 2.3.6, mutta työntömitta ei noudata, kuva 2.3.7. [6]



Kuva 2.3.6 Mikrometri noudattaa Abbén periaatetta. [5, s. 195]



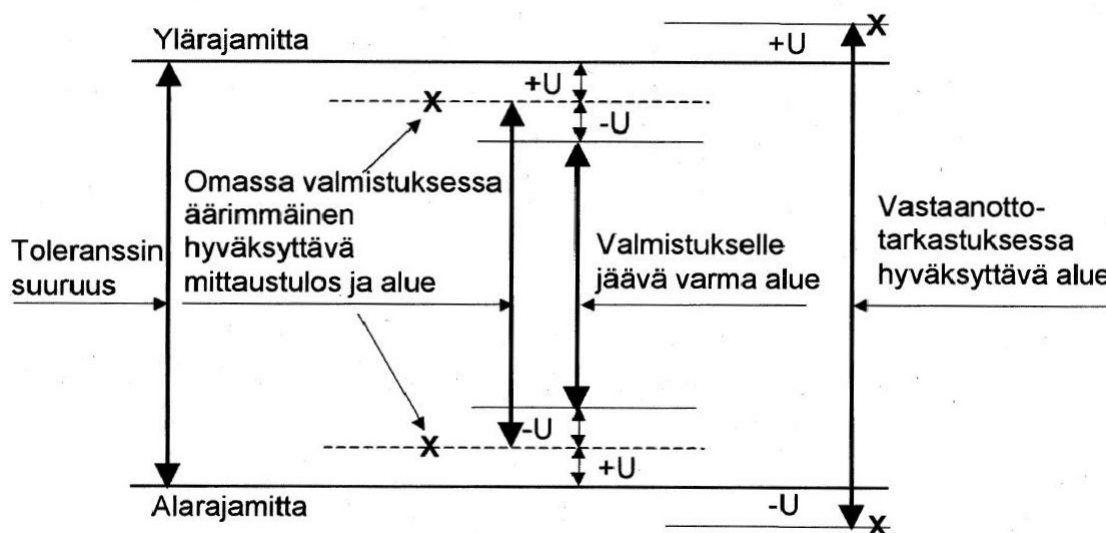
Kuva 2.3.7 Työntömitta ei noudata Abbén periaatetta. [5, s. 195]

2.4 Mittausepävarmuus

Mittausepävarmuus kuvaa mittaustuloksen oletettua vaihtelua ja kertoo mittaustuloksen luotettavuudesta. [4, s. 26] Kuten jo aikaisemmin on kerrottu, kaikissa mittauksissa on virhettä, eikä virhettä voida täysin korjata. On tärkeää tuntea ja tiedostaa korjauksista jäävä epävarmuus. Mittausepävarmuus kertoo, millä välillä mittaussuureen tosiarvo todellisuudessa on. [7] Jotta eri pakoissa tehtyjä mittauksia, eri mittausvälinein, voitaisiin verrata, täytyy olla yhtenäinen menetelmä mittausepävarmuuden määrittämiseksi. Mittaustuloksen luotettavuuden tunteminen on erityisen tärkeää kalibrointiin liittyvissä mittauksissa. [6]

Ellei mittausepävarmuutta tunneta, ei voida sanoa, onko tuote toleranssien mukainen vai ei. On virheellinen käytäntö hyväksyä tuote vain sen perusteella, että mittaustulos on toleranssialueella. Tuotteen valmistajan ja myyjän mittauksissa tuotteen olisi täytettävä toleranssit myös mittausepävarmuus huomioon otettuna. Tuotteen valmistajan tai

toimittajan osalta mittausepävarmuus siis pienentää käytettävissä olevaa toleranssialuetta. Toisaalta tuotteen ostajan osalta mittausepävarmuus kasvattaa poikkeamia, jotka heidän on hyväksyttävä, koska on oltava varma, ettei tuote täytä toleranssivaatimuksia, kuten kuvasta 2.4 nähdään. Tästä säännöstä saattaa olla kuitenkin alakohdaisia poikkeuksia. [7] & [30]



Kuva 2.4 Mittausepävarmuuden vaikutus hyväksymis-/hylkäysrajoihin valmistuksessa ja vastaanottotarkastuksessa. [6, s. 176]

Nykyisin useissa lähteissä mainitaan ”taloudellinen mittausepävarmuus”, jolloin käytettävän menetelmän mittausepävarmuuden tulisi olla alle 1/10 IT-toleranssiasteesta. Tämä perustuu siihen, että mittausepävarmuus U pienentää käytettävissä olevaa toleranssi aluetta $2 \cdot U$ verran omassa valmistuksessa. Näin pyritään takaamaan valmistukselle mahdollisimman suuri vaihteluväli, koska tarkempaan valmistukseen investointi on mittavälineitä kalliimpaa. Jotta tarkastaminen on järkevää, olisi mittausepävarmuuden oltava alle 1/3, mielellään alle 1/5, IT-toleranssista. [6] & [9]

Mittausepävarmuuden määrittäminen edellyttää mittauksen virhelähteiden hyvää tuntemusta. Tarvitaan hyvää teoreettista tuntemusta ja kokemusta mittauksista sekä kokeita. Mittausepävarmuus voidaan määritellä joko tietylle mittauslaitteelle ja mittaajalle tietyissä olosuhteissa tai koskemaan hyvinkin laajaa osaa jonkin tehtaan samantapaisia mittauksia. Mittausepävarmuudelle ilmoitetaan usein kattavuuskerroin k , joka vastaa tilastollisia todennäköisyyksiä. Kattavuuskerrointa k arvoilla 1, 2 ja 3 vastaavat tilastolliset todennäköisyydet n. 68,3 %, 95,5 % ja 99,7 %. Kertoimen arvo 2 siis vastaa normaalijakautuneen suureen 95,5 % todennäköisyys aluetta. [7, s. 56]

Mittaustulos ilmoitetaan usein muodossa $y \pm U$, jossa y on mittaustulos ja U laajennettu epävarmuus. Kun standardiepävarmuus $u(y)$ kerrotaan kattavuuskertoimella k , saadaan

laajennettu epävarmuus. [7] Epävarmuus voidaan jakaa myös kahteen tekijään ja ilmoittaa muodossa:

$$U \pm k * (A + y * B) \quad (6)$$

Tällöin A on epävarmuusarvon vakio osa ja B mitatusta suureesta y riippuva osa. Mittausepävarmuus kasvaa, kun mitattavan suureen arvo kasvaa. [6, s. 156]

2.4.1 Kokeellinen määrittäminen

Mittausepävarmuuden määrittäminen luotettavasti vaatii aina kokeiden tekemistä. Kokeiden avulla on usein mahdollista käsitellä asioita, joiden teoreettinen käsittely olisi hyvin mutkikasta. Kokein on mahdollista selvittää satunnaisvirheistä johtuvat poikkeamat ja mitä laajemmin ja pidemmän aikaa kokeita suoritetaan, sitä suurempi osa virheistä muuttuu satunnaisiksi. Kun mittauksia tekevät eri mittaaajat eri päivinä ja eri mittauslaitteita käyttäen, muuttuvat nämä peräkkäisissä mittauksissa systemaattiset virheet satunnaisiksi. [7]

Kaikessa mittaamisessa tapahtuu satunnaista vaihtelua, mikä on yksi mittausepävarmuuden määrittämisen keskeinen tekijä. Satunnaisvaihtelu on aina selvitettävissä toistamalla mittauksia useita kertoja. Satunnaisvirheiden vaikutus mittausepävarmuuteen saadaan laskemalla toistetuille mittauksille keskihajonta. Yhtälö (2) keskihajonnalle s on esitetty jo aiemmin tässä työssä satunnaisvirheiden alla. Jotta keskihajonnalle saadaan luotettava arvo, on mittauksia tehtävä suuri määrä, yli 10. Jos mittauksia on vähemmän, on keskihajonnalle luotettavan arvon saamiseksi tulos kerrottava taulukossa 2.4.1 olevalla varmuuskertoimella h. [7]

Taulukko 2.4.1 Varmuuskertoimet keskihajonnan laskentaan pienestä määrästä mittauksista. [7, s. 59]

Mittausten lukumäärä	Varmuuskertoimen h
2	7,0
3	2,3
4	1,7
5	1,4
6	1,3
7	1,3
8	1,2
9	1,2

Koemittauksin voidaan selvittää myös jonkin yksittäisen virhelähteen vaikutusten suuntaa ja suuruutta. Kokeissa muutetaan tutkittavaa parametria hallitusti ja toistetaan mittauksia. On tärkeää muuttaa aina vain yhtä parametria kerrallaan, eikä liian isoja

hyppäyksiä kerralla. Menetelmää voidaan käyttää mm. mittausvoiman ja lämpötilaeron vaikutusten selvittämiseen. [7]

RR-testin nimi tulee englanninkielisistä sanoista ”repeatability” = toistettavuus ja ”reproducibility” = uusittavuus. Testi on hyvä mittauksen satunnaisten virheiden suuruuden määrittämiseen, muttei juuri paljasta systemaattisen virheen lähteitä. On olemassa lyhyt, pitkä ja aistinvarainen RR-testi. Aistinvarainen testi ei liity mittausepävarmuuteen, vaan siinä aistinvaraisesti joko hylätään tai hyväksytään tuote, esimerkiksi ulkonäön tai tulkkauksen perusteella. [7]

Lyhyen RR-testin toteuttamiseen tarvitaan vain yksi mittaja, joka mittaa useita kappaleita mieluiten ainakin kolme kertaa. Tulokset kirjataan taulukkoon, niin ettei mittaja tiedä edellisten mittauksien tuloksia. Testin tulos ”RR-arvo” saadaan laskemalla saman kappaleen mittauksien suurimpien erojen keskiarvo, joka kerrotaan $5,15/d_2$. Kerroin d_2 saadaan taulukosta 2.4.2. Se määräytyy mitattavien kappaleiden ja mittauksien perusteella. RR-arvo kuvaa mittauksen satunnaisvirhettä 99 % luottamustasolla. [7]

Taulukko 2.4.2 Kertoimen d_2 määräytyminen mittauksien ja mitattavien kappaleiden lukumäärän mukaan. [7, s. 60]

Mittaukskertoja							
Mittaja x Kappaleita	Kpl	2	3	4	5	6	7
	1	1,41	1,91	2,24	2,48	2,67	2,83
	2	1,28	1,81	2,15	2,4	2,6	2,77
	3	1,23	1,77	2,12	2,38	2,58	2,75
	4	1,21	1,75	2,11	2,37	2,57	2,74
	5	1,19	1,74	2,1	2,36	2,56	2,73
	6	1,18	1,73	2,09	2,35	2,56	2,73
	7	1,17	1,73	2,09	2,35	2,55	2,72
	8	1,17	1,72	2,08	2,35	2,55	2,72
	9	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72
	10	1,16	1,72	2,08	2,34	2,55	2,72
	11	1,16	1,71	2,08	2,34	2,55	2,72
	12	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,72
	13	1,15	1,71	2,07	2,34	2,55	2,71
	14	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71
	15	1,15	1,71	2,07	2,34	2,54	2,71
	>15	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534	2,704

Pitkä RR-testi on muuten samanlainen kuin lyhyt, mutta pitkässä on useampi mittaja, yleensä kolme henkilöä. Pitkällä testillä voidaan mittajasta ja mittauslaitteesta johtuvat virheet erottaa toisistaan. Toistettavuuden oletetaan olevan mittauslaittekohtainen ominaisuus. Uusittavuus puolestaan kuvaa mittajan kykyä, vaikka siihen todellisuudessa vaikuttaa myös mitattava kohde ja mittausväline. [7]

Type 1 -mittaustestissä yksi mittaaja mittaa samaa tunnettua halkaisijaa vähintään 10, mielellään 25, kertaa samalla mittausvälineellä. Testi kertoo mittauksen systemaattisesta virheestä, eli pystytäänkö mittaamalla saamaan oikea mittaustulos. Lisäksi testi kertoo, miten hyvin mittaaja ja mittauslaite pystyvät toistamaan mittauksen. Testi soveltuu hyvin uuden mittauslaitteen nopeaan testaukseen ennen käyttöönottoa, mutta ei ole yhtä kattava kuin pitkä RR-testi. [25]

2.4.2 Laskennallinen määrittäminen

Mittaussuureen Y arvo ei yleensä muodostu vain yksittäisestä mittaustuloksesta, vaan se määritellään useamman muun suureen avulla. Nämä lähtösuureet X_i voivat olla mm. mittanormaanin pituus, vertailulaitteen lukema, mitan lämpötila tai mittausvoima. Myös lähtösuureet voivat olla riippuvaisia muista suureista ja niihin voidaan tehdä korjauksia tai korjaukset voivat olla omina lähtösuureinaan. Mittaussyuureen riippuvuus lähtösuureista voidaan esittää yhtälönä:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n) \quad (7)$$

Pituusmittausten tapauksessa yhtälö voidaan usein esittää tulokseen vaikuttavien tekijöiden summana. [7] & [8]

Lähtösuureiden arvot ja niiden epävarmuudet voidaan saada joko sen hetkisistä mittauksista, tai ulkopuolisista lähteistä kuten kalibrointitodistuksesta. Mittaussyuureen arvon tulee sisältää kaikki tarvittavat korjaukset ja korjausten epävarmuudet tulee huomioida epävarmuudenarvioinnissa. Jollei korjauksia pystytä tekemään, tulee ne käsitellä epävarmuuksina. Lähtösuureen arvon x_i standardiepävarmuus $u(x_i)$ on suureen keskihajonta (yhtälö 2). Mittaustuloksen standardiepävarmuus $u(y)$ muodostuu eri osatekijöiden epävarmuuksien $u(x_i)$ yhteisvaikutuksena, mittaussyuureen ja lähtösuureiden riippuvuussuhteiden f mukaan. Lähtösuureiden epävarmuuksien arviointiin on olemassa ”tyypin A” ja ”tyypin B” mukainen menettely. [7] & [8]

Tyypin A epävarmuusarviossa mittausepävarmuus $u(x_i)$ arvioidaan useiden mittaustulosten pohjalta tilastollisin menetelmin, jolloin standardiepävarmuuden arviona käytetään mittaustulosten keskiarvon keskihajontaa. Mittaukset tulee olla suoritettu samoissa olosuhteissa. Jos mittausten lukumäärä on alle 10, ei epävarmuuden arvio ole luotettava. Tällöin on pyrittävä kasvattamaan mittausten määrää tai pyrittävä hyödyntämään kokemusta ja aikaisempia mittaustuloksia samoissa oloissa. Jollei tulosten määrää voida kasvattaa, on keskihajonta kerrottava varmuuskertoimella h , joka saadaan taulukosta 2.4.1. [6] & [7]

Kun lähtösuureesta q on saatu n -määrä riippumattomia mittaustuloksia, voidaan $q:n$ arvon estimaattina käyttää tulosten keskiarvoa, yhtälö 8.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (8)$$

Mittaustulokset q_j poikkeavat toisistaan mittauksissa tapahtuvan vaihtelun takia, jolloin havaintojen varianssi voidaan määrittää yhtälön 9 avulla. Varianssin positiivinen neliöjuuri on q :n arvojen kokeellinen keskihajonta $s(q)$.

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (9)$$

Mittaustulosten keskiarvon keskihajonnan kokeellinen estimaatti saadaan yhtälöstä 10, joka on myös arvoon liittyvä standardiepävarmuus, yhtälö 11. [6], [7] & [8]

$$s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad (10)$$

$$u(q) = s(\bar{q}) \quad (11)$$

Jos käytettävissä olevien mittaustulosten määrä on alle 10, voi keskihajonta epävarmuuden arviona olla epäluotettava. Jollei mittausten lukumäärää voida kasvattaa, eikä epävarmuuden arviointiin ole muita keinoja, voidaan mittaustuloksiin soveltaa t-jakaumaa. Esimerkiksi 5 mittauksella virhe on n. 30 % jos käytetään normaalijakaumaa t-jakauman sijasta. [7]

Tyypin B epävarmuusarvio perustuu muiden kuin tilastollisten menetelmien käyttöön. Tyypin B arvio perustuu tietoon ja kokemukseen. Tietolähteitä voivat olla aikaisemmat mittaustulokset, valmistajan spesifikaatiot, kalibrointitodistukset tai muut luotettavat asiakirjat ja taulukot ja yleensä kokemus aiheesta ja laitteesta. Näin saatu epävarmuus voi olla yhtä hyvä arvio kuin muillakin keinoilla saatu epävarmuusarvio. [7]

Joskus lähtösuurelle voi olla saatavilla vain yksi arvo ja tälle mahdollisesti annettu epävarmuus. Jos epävarmuus ei ole tiedossa, se voidaan joskus arvioida kirjallisuuden tai kokemuksen perusteella. Voi olla myös tilanteita, jolloin lähtösuureen todennäköisyysjakauma tunnetaan ja silloin epävarmuutena käytetään jakauman hajontaa. [7]

On tilanteita, jolloin lähtösuurelle x_i tiedetään tai voidaan päätellä sekä ylä- että alaraja. Tällöin usein voidaan olettaa suureen arvojen jakautuvan tasaisesti raja-arvojen väliin. Näin suureen arvo saadaan yhtälöstä 12 ja standardiepävarmuus $u(x_i)$ yhtälöstä 13. [6] & [7]

$$x_i = (\text{yläraja} + \text{alaraja}) / 2 \quad (12)$$

$$u(x_i) = (\text{yläraja} - \text{alaraja}) / (2\sqrt{3}) \quad (13)$$

Mittaustuloksen standardiepävarmuuden $u(y)$ neliö, jos lähtösuureet ovat riippumattomia, saadaan laskemalla lähtösuureiden standardiepävarmuudet yhteen neliöllisesti, yhtälö 14.

$$u(y)^2 = \sum_{i=1}^n [c_i u(x_i)]^2 \quad (14)$$

c_i on lähtösuureen x_i herkkyyskerroin, joka kuvaa mittaussuureen arvon y herkkyyttä x_i :n pienille muutoksille. Herkkyyskerroimen määrittäminen voi tapahtua numeerisesti, analyttisesti tai kokeellisesti. Jos lähtösuureen arvoa muutetaan Δx_i verran ja samalla mittaussuureen arvo muuttuu Δy_i :n verran, on herkkyyskerroimella yhtälössä 15 esitetty muoto.

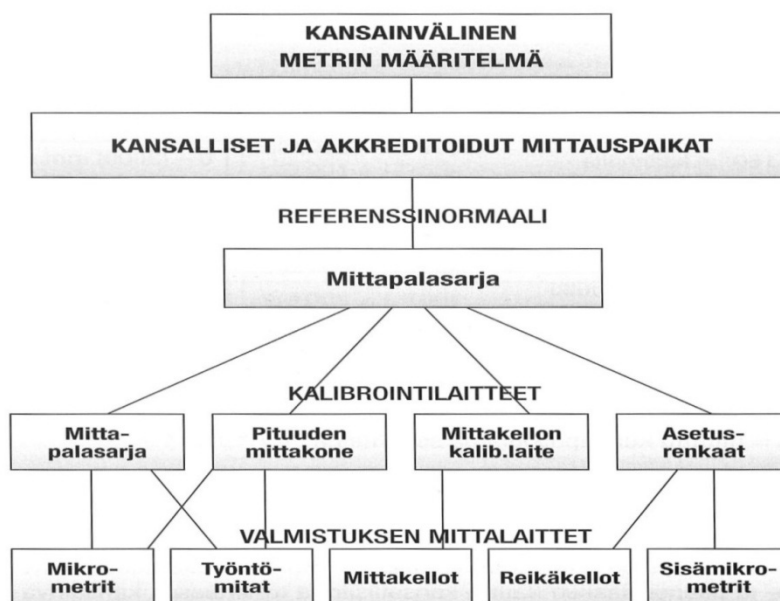
$$c_i = \frac{\Delta y}{\Delta x_i} \quad (15)$$

Herkkyyskerroimen mahdollinen riippuvuus lähtösuureen arvosta täytyy ottaa huomioon. Esimerkiksi kosinivirheen suuruus riippuu huomattavasti kulman suuruudesta. Myös lähtösuureiden väliset riippuvuudet täytyy ottaa huomioon mittausepävarmuutta laskettaessa tai mittausepävarmuuden arvio voi muodostua virheelliseksi. Kahden toisistaan riippuvaisen lähtösuureen epävarmuudet lasketaan yleensä lineaarisesti yhteen. [7] & [8]

Yleisimmin pituusmittauksissa epävarmuuskomponenttien herkkyyskerroin on 1, eli epävarmuudet vaikuttavat mittaustulokseen juuri omalla arvollaan. Lämpöpitenemiskerroin ei kuitenkaan noudata tätä sääntöä. Lämpöpitenemisen aiheuttamaan epävarmuuteen vaikuttaa kappaleen koko, lämpötilaero ja materiaali-kohtainen lämpöpitenemiskerroin. [7]

2.5 Kalibrointi

Kalibrointi pitää sisällään toimenpiteet, joilla saadaan selville mittauslaitteen, mittausjärjestelmän tai kiintomittarin antamien suureiden arvojen ja mittanormaaleilla toteutettujen arvojen välinen yhteys. Kalibroinnilla voidaan määrittää mittauslaitteen näyttämä tai määrittää sille korjaus. Kalibroinnissa saadut tulokset kirjataan kalibrointitodistukseen tai -pöytäkirjaan, joka seuraa mittauslaitteen mukana. Kalibrointiin liittyy keskeisesti jäljitettävyyden käsite, joka tarkoittaa mittaustuloksen tai mittanormaanin yhteyttä referenssinormaaliiin. [4, s. 36] Kaikki akkreditoitujen kalibrointilaboratorioiden kalibroinnit täytyy voida jäljittää kansalliseen tai kansainväliseen mittanormaaliin. Esimerkki jäljitettävyyssketjusta on kuvassa 2.5. Kalibrointitodistuksesta selviää kalibroinnin tulos, tuloksen epävarmuus, jäljitettävyyssketju ja kalibrointimenetelmä. [6]



Kuva 2.5 Esimerkki kalibrointiketjun jäljitettävyydestä. [7, s. 42]

Ensimmäinen kalibrointi mittauslaitteelle täytyy tehdä ennen sen käyttöönottoa. Ensimmäinen kalibrointi on hyvin tärkeä, koska siinä selvitetään laitteen ominaisuuksia, kuten mikrometrin kaaren jäykkyys ja tasojen kohtisuoruudet. Näin niitä ei enää myöhemmin tarvitse tutkia, ja siten voidaan varmistaa laitteen tarkkuus. Kalibrointitodistusta käytetään tarvittavien korjausten tekemiseen ja mittausepävarmuuden määrittämiseen. [7]

Teollisuudessa käytettävät mittavälineet voidaan jakaa kolmeen ryhmään, joita ovat referenssinormaalit, kalibrointilaitteet ja mittausvälineet. Jaottelun avulla voidaan päätellä mistä laitteen jäljitettävyyks tulee ja mihin laitteita käytetään. [7]

Referenssinormaali välittää jäljitettävyyden yritykseen ja sitä ei tule käyttää kuin kalibrointilaitteiden kalibrointiin, jottei se pääse käytössä vahingoittumaan. Referenssinormaalit kalibroidaan ulkopuolisessa akkreditoidussa tai kansallisessa mittanormaalilaboratoriossa. Tyypillinen referenssinormaali on mittapalasarja. [7]

Kalibrointilaitteet välittävät jäljitettävyyden varsinaisiin tuotannossa käytettäviin mittauslaitteisiin. Kalibrointilaitteet voidaan mahdollisesti kalibroida itse referenssinormaaliiin, jos referenssinormaali on käytettävissä. Näin laite tulee tutuksi omalle henkilöstölle. [7]

Mittauslaitteiden kalibrointi voidaan myös tehdä itse, mutta myös ulkopuolisia palveluntarjoajia on. Tärkeää on, että mittaus on jäljitettävissä ja mittausepävarmuus ilmoitetaan. Yleensä tulisi tarkistaa kaikki laitteen keskeiset ominaisuudet.

Mikrometrissä olisi tarkistettava myös kärkien tasomaisuus ja yhdensuuntaisuus sekä mittausvoima. Jollei kaikkia virhelähteitä tarkisteta kalibroitaessa, on ne huomioitava kuitenkin epävarmuutta laskettaessa. [7]

2.5.1 Kalibrointi- ja mittausolosuhteet

Mittausolosuhteilla on suuri vaikutus mittauksissa. Se miten tiukkoja vaatimuksia olosuhteille on asetettava, riippuu siitä mitä mitataan, millä välineillä mitataan ja kuinka paljon mitataan. Taulukossa 2.5.1 esitetään olosuhdevaatimuksia erityyppisiin mittaustilanteisiin.

Taulukko 2.5.1 Mittaustilojen olosuhdevaatimukset. [7, s. 16]

Ominaisuus		Korkeatasoinen kalibrointi	Vaativat mittaukset ja tavalliset kalibroinnit	Normaalit mittaukset ja vaatimattomat kalibroinnit	Välttävät mittaukset
Lämpötila työtasossa		20 °C ± 0,5 °C	20 °C ± 1 °C	19 ... 24 °C	15 ... 25 °C
Lämpötilaerot tilan eri osissa		Maks. 0,6 °C	maks. 2 °C	maks. 4 °C	-
Lämpötilan vaihtelu tunnissa		Maks. 0,1 °C	maks. 0,3 °C	maks. 1 °C	maks. 1,5 °C
Lämpötilan vaihtelu vuorokaudessa		Maks. 0,6 °C	maks. 1 °C	-	-
Ilman suhteellinen kosteus		35 ... 55 %	35 ... 55 %	20 ... 70 %	Max. 80 %
Värähte- -lyt	Amplitudi/Taajuus	0,25 µm/200 Hz ... 3 µm/5 Hz	1 µm/20 Hz ... 3 µm/10 Hz	Ei selvästi havaittavaa värähdystä	Ei selvästi häiritsevää värähdystä
Valaistus		800 ... 1000 lux	800 ... 1000 lux	800 ... 1000 lux	500 ... 1500 lux
Puhdistus	Koko	< 0,5 µm	< 5 µm	Puhdistuksesta huolehditaan hyvin	Puhdistuksesta huolehditaan normaalisti
	Määrä	3 x 10 ⁷ kpl/m ³	1 x 10 ⁷ kpl/m ³		
Ilman virtausnopeus		< 150 mm/min	< 300 mm/min	Ei tuntuvaa vetoa	Ei selvästi tuntuvaa vetoa
Melu		<40 dBA	<50 dBA	< 60 dBA	< 90 dBA

2.5.2 Kalibrointijakso

Yritys päättää itse miten usein mittauslaitteet kalibroidaan. Kalibroinnin on kuitenkin täytettävä yrityksen laatujärjestelmän vaatimukset ja ne on pystyttävä todentamaan. Yleisesti on käytössä kiinteät kalibrointijaksot, koska näin kalibrointi on helpoin järjestää ja pitää huolta sen toteutumisesta. Liian tiheä kalibrointijakso aiheuttaa tarpeettomia kustannuksia, mutta liian harva jakso voi taas kasvattaa tuotannon hävikkiä tarpeettomasti. Lyhimpänä, järkevänä kalibrointivälinä voidaan pitää neljää kuukautta ja pisimpänä 48 kuukautta. Jollei neljän kuukauden kalibrointijakso ole riittävän lyhyt, on kalibrointi järkevää ottaa osaksi mittausprosessia. [7]

Kalibrointijaksoa pidentäviä tekijöitä ovat mm. peräkkäiset kalibroinnit, joissa ei ole havaittu muutoksia mittauslaitteessa, pieni mittausepävarmuus vaadittuun toleranssiin nähden ja muut yleiset mittauslaitteen laatu- ja tarkkuuskohdat. Kalibrointijaksoa lyhentäviä seikkoja ovat mm. suuret vaihtelut edellisissä kalibroinneissa, laitteen suuri käyttömäärä, suuri mittausepävarmuus ja mitattavan kohteen kriittisyys valmistuksen tai tuotteen toiminnan kannalta. Jos laite ei enää täytä sille asetettuja vaatimuksia, se on hävitettävä ja mielellään tuhottava, ettei sitä enää oteta mittauskäyttöön. [7]

2.6 Mittaaminen

Mittauksen tavoite on varmistaa ja osoittaa mittauksen kohteen täyttävän sille asetetut vaatimukset. [6] Valmistusta voidaan säätää vain saatujen mittautulosten pohjalta. Vaikka valmistus mahdollistaisi paremman tarkkuuden kuin voidaan mitata, ei prosessia voida säätää kuin mittausepävarmuuden sallimissa rajoissa. Jos mittausepävarmuutta ei tunneta, voidaan prosessia säätää turhaan jokaisen kappaleen jälkeen ja kappaleista ei tule tasalaatuisia. [7]

Mittauslaitteet ovat yleensä herkempiä kuin tuotantovälineet, joten niiden käsittelyssä on syytä olla varovainen. Mittauslaitteita ei tule käyttää kuin niille suunniteltuun käyttötarkoitukseen, jotteivät laitteet vahingoitu tai kulu tarpeettomasti. Ennen mittauksia on syytä tarkistaa mittauslaitteen kunto ja varmistua, että käytetään oikeaa mittauslaitetta. Mittauslaitteella tai -menetelmällä saavutettava mittausepävarmuus ei saisi olla yli 1/3 sallitusta toleranssialueesta ja taloudellisenä epävarmuutena pidetään 1/10 toleranssialueesta. Mittauslaitteiden altistamista lastuamisnesteille ja hiomapölylle on vältettävä, etenkin mittakellojen osalta, ettei niiden mittauskaran laakerointi vahingoitu. [5]

Lämpötilan vaikutus mittautulokseen on muistettava varsinkin isoja (>100 mm) mittoja mitattaessa. Mikrometrejä on pidettävä kiinni lämmöneristeestä, jos sellainen mitassa on, jottei käsi lämmitä mikrometriä. Mittaus on syytä toistaa useampia kertoja ja varmistua, ettei mitta muutu. Kappale on myös hyvä mitata useammasta kohdasta. Aina mittauksen jälkeen on syytä miettiä, ovatko tulokset järkeviä ja huolehtia, että ne on huolella kirjattu. [5]

Eri kohteissa voi olla tarve mitata hyvinkin erilaisia suureita, kuten pituutta, massaa, aikaa, sähkövirtaa, lämpötilaa, ainemäärää tai valovoimaa tai jotain näiden perussuureiden johdannaisyksiköistä. [4] Mittavälineet onkin hyvä jaotella mitattavan suureen mukaan. Konepajoissa tehdään lähinnä pituudenmittauksia ja tarkastetaan pituus- ja geometrisiä toleransseja ja mahdollisesti pinnankarheuksia. [7]

2.7 Mittauslaitteet

Mittauslaitteita on todella monenlaisia, niin kuin on mitattavia suureitakin, eikä tässä työssä ole tarkoitus perehtyä kuin pieneen osaan niistä. Pituudenmittauslaitteet voidaan jakaa esimerkiksi kiinteisiin (asetus-) mittauslaitteisiin, osoittaviin mittauslaitteisiin ja muihin mittauslaitteisiin. Kiintomittoja ovat mittapalat, tulkit ja mallit. Osoittavia mittauslaitteita puolestaan ovat mittakellot, mikrometrit, työntömitat ja sähköiset anturit. Lisäksi on mm. erilaisia mittauskoneita ja työstökoneiden mitta-antureita, kuten lineaarisia mittasauvoja ja kulma-antureita. [6] & [31]

Mittauslaitteet voidaan jakaa myös käsimittauslaitteisiin ja mittauskoneisiin. Suurin osa mittauslaitteista on käsimittauslaitteita ja niihin usein perustuu valmistuksen laadunvarmistus. Ne ovat usein muita mittauslaitteita edullisempia eikä niitä välttämättä osata tästä syystä arvostaa. Usein voidaan olettaa, että kaikki osaavat niitä käyttää niiden näennäisen yksinkertaisuuden takia, vaikkei asia automaattisesti näin olekaan. Käsimittauslaitteiden huollosta ja kalibroinnista on yhtä tärkeää pitää huolta kuten muidenkin laitteiden. Myös henkilöstön osaamisesta on huolehdittava ja järjestettävä tarvittaessa koulutusta. Käyttäjien osaamisen testaamiseen soveltuu hyvin esimerkiksi RR-testi. [7]

Mittauskoneet ovat kalliita hankkia ja niiden käyttö vaatii enemmän koulutusta. Tästä syystä niitä arvostetaan enemmän. Koneiden ohjelmistot voivat olla kuitenkin vaikeaselkoisia ja niiden hallitseminen vaatii paljon koulutusta. Koulutuksen järjestäminen ei välttämättä ole helppoa, koska voi olla, ettei edes maahantuoja osaa sitä antaa. Mahdollisesti pintapuolisen koulutuksen takia koneiden tuloksiin ei osata suhtautua riittävän kriittisesti, eikä arvokasta konetta osata huoltaa oikein. Mittauskoneet ovat kuitenkin avainasemassa laadunvalvonnassa. [7]

2.7.1 Mikrometrit

Mikrometri on konepajojen yleisin käytössä oleva mittauslaite, joita on sekä sisäpuolisten että ulkopuolisten pintojen välisten etäisyyksien mittaukseen. Mikrometrissä on tarkkanousuinen ruuvi, jota kierrettäessä mittauskara liikkuu. Karan liikkeen suuruus voidaan sitten lukea mittausrummun kehältä. Yleisimmin yhden kierroksen nousu on 0,5 mm, tämän takia yhden rummunkierroksen suuruinen lukemavirhe on mikrometrille yleinen karkean virheen lähde. Usein mikrometrien asteikko on 0.01 mm jaolla, mutta uusissa digitaalisella näytöllä varustetuissa jako voi olla myös 0.001 mm. [6] & [10]

Kaarimikrometri, kuva 2.7.1, on ulkopuolisten pintojen mittaukseen tarkoitettu mittausväline, joita on jopa yli 1 m mittojen mittaukseen. Tyypillisesti mittausalue on 25 mm ja tästä syystä vain pienimmän 0...25 mm mikrometrin kärjet voidaan yhdistää nollapisteen asettamiseksi. Muissa kokoluokissa nollapisteen asettamiseen käytetään

tappitulkkeja, joiden pitäisi aina olla mikrometrin mukana. Nollapisteen asettaminen on tärkeää tehdä aina ennen mittaus, jotta voidaan varmistua mikrometrin asteikon olevan kohdallaan. Mittausvoima voi mikrometreillä kasvaa hyvin suureksi, joka voi vahingoittaa mitattavaa kappaletta. Lisäksi mittausvoiman vaihtelu aiheuttaa hajontaa mittaustuloksiin. Toinen vaikeasti hallittava virhelähde on mikrometrin kaaren lämpeneminen mitaajan kädessä. Tämän takia mikrometriä on aina pideltävä kaaressa olevasta eristeestä, jos sellainen on. Kierteiden, kierretappien ja hammasvälin mittaamiseen on myös omia erikoismikrometrejä. [6] & [10]



Kuva 2.7.1 Kaarimikrometri. [10]

Reikämikrometrit ovat vastakkaisten (sisäpuolisten) pintojen mittaamiseen tarkoitettuja mittauslaitteita, joita ovat tikku-, sisä- ja kolmipistemikrometrit. Sisämikrometri sopii pienien halkaisijoiden mittaamiseen, kuva 2.7.2. Laite hakeutuu automaattisesti kohtisuoraan reiän akselia vastaan pitkien kosketuspintojen ansiosta. [6]



Kuva 2.7.2 Sisämikrometri. [10]

Tikkumikrometrillä voidaan mitata suuriakin yli 2 m:n halkaisijoita. Mitta kootaan eripituisista jatkovarsista, joissa yhdessä on mikrometriruuvi, kuvassa 2.7.3. Tikkumikrometrin käyttö on hankalaa ja varsinkin laitteen saaminen kohtisuoraan mitattavaa pintaa kohden on hankalaa ja vaatii tarkkuutta sekä kokemusta. [6] & [10]



Kuva 2.7.3 Tikkumikrometri. [10]

Kolmipistemikrometrissä mittauskärjet ovat 120° jaolla, ja se soveltuu hyvin pienehköjen reikien mittaamiseen. Niitä ei kuitenkaan ole saatavilla suurimpien tikkumikrometrien kokoluokassa. Kolmipistemikrometri on tikkumikrometriä helpompi ja luotettavampi kohdistaa reikään ja usein hieman tarkempi. Sillä voi helposti paljastaa reiän kolmiomaisuuden. Se ei kuitenkaan paljasta reiän soikeutta, joka voidaan havaita sisäpuolisella 2-piste- tai tikkumikrometrillä mittaamalla reikä useammasta kohtaa. Kolmipistemikrometrin asettamiseen käytetään kalibroitu tulkkirengas. Kuvassa 2.7.4 Mitytoyo:n kolmipistemikrometri. [6] & [10]

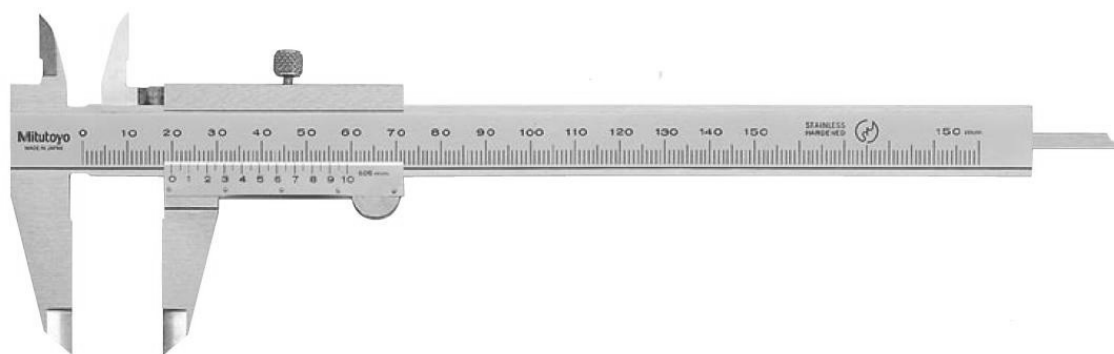


Kuva 2.7.4 Kolmipistemikrometri. [10]

2.7.2 Työntömitat

Työntömitta on myös hyvin yleinen mittausväline konepajoissa, jolla voidaan mitata sekä sisä- että ulkopuolisia pituuksia ja syvyyksiä. On olemassa myös

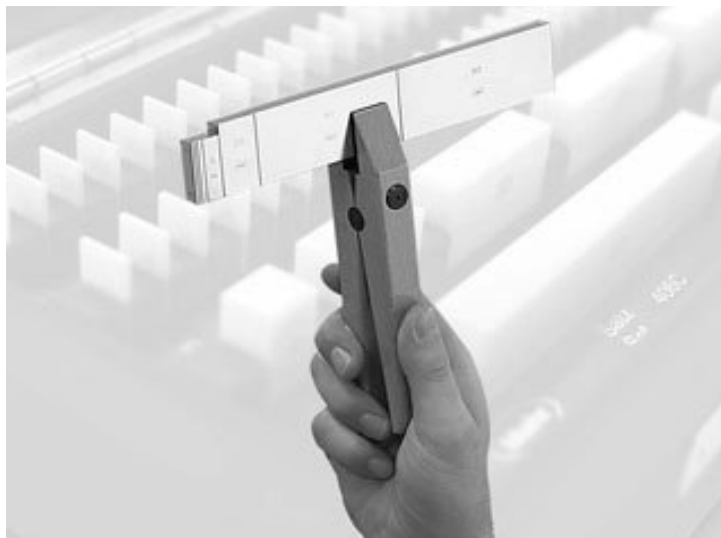
erikoissovelluksiin kehitettyjä työntömittoja, kuten hammaspyörän hampaan mittaukseen tai syvyyden mittaamiseen. Tavallisesti työntömitassa on niin sanottu noniuksen asteikko 1/10, 1/20 tai 1/50 jaolla, joista jälkimmäisen lukeminen on jo hankalaa. Uudemmissa mitoissa mitta-asteikkona voi olla myös magneettinauha ja tulos saadaan digitaaliselta näytöltä. Digitaalisten näyttöjen lukemataarkkuus on yleisesti 0,01 mm. Hyvälaatuisen työntömitan mittaasepävarmuus on parhaimmillaan vain $\pm 0,05$ mm luokkaa. Digitaalinen näyttö pienentää kuitenkin lukemavirheiden todennäköisyyttä ja mahdollistaa mittaustulosten suoran siirron digitaaliseen tietokantaan. Työntömitta ei noudata Abbén periaatetta. Kuvassa 2.7.5 tavallinen työntömitta noniuksen asteikolla. [6]



Kuva 2.7.5 Työntömitta. [10]

2.7.3 Mittapalat

Mittapaloja käytetään pituuden mittauksen mittanormaaleina, jotka voivat olla tehty karkaistusta teräksestä, kovametallista, lasista tai keramiikasta. Ne ovat suuntaissärmiön muotoisia kappaleita ja niiden mittapinnat on hierretty keskenään yhdensuuntaisiksi ja hyvin tasomaisiksi. Eripituisia paloja voidaan imeyttää yhteen, koska niiden pinnat ovat tasomaisia ($R_{\max} \approx 0,05 \mu\text{m}$), jolloin pintojen välille syntyy heikko metallinen sidos. Jos palat jätetään useiksi päviksi yhteen, palat hitsautuvat yhteen ja vaurioituvat irrotettaessa. Kuvassa 2.7.6 on yhteen imeytettyjä mittapaloja. [6]



Kuva 2.7.6 Yhteen imeytettyjä mittapaloja. [11]

Teräksiset mittapalat jaetaan standardissa EN-ISO 3650:1998 neljään ryhmään palojen tarkkuuden perusteella. Jaotteluperusteita on mittapalan virhe ja mittapinnan virhe. Mittapalan epävarmuus ilmoitetaan muodossa

$$t_e = \pm (u_s + s L) \mu\text{m} \quad (16)$$

jolloin mittapalan systemaattinen virhe on u_s , palan pituuteen verrannollinen virhe s ja mittapalan pituus L . Tarkimman K ryhmän mittapalat on tarkoitettu kalibrointikäyttöön ja jäljitettävyyden siirtoon ja pienimmän tarkkuuden palat mittausvälineiden asettamiseen verstaalla. [6] & [12]

Mittapalat hankitaan sarjoina, jotta yhdistelemällä paloja saadaan haluttu mitta. Sarjojen koko vaihtelee 30:sta aina yli 100 palaan. Mitä enemmän paloja on käytettävissä, sitä vähemmän tarvitaan imeytyksiä ja yhdistetty epävarmuus pysyy pienempänä. Mittapalat täytyy kalibroida säännöllisesti ja niitä on muistettava huoltaa. Metalliset mittapalat säilytetään rasvattuna hapettumisen ehkäisemiseksi. Mittapaloja on myös keraameista tai alumiinista valmistettuja. Niiden lämpöpitenemiskertoimet on tiedettävä ja tiedostettava tarkasti.[6]

2.7.4 Tulkit

Tulkkeja voidaan käyttää mitan siirtoon ja mittausvälineiden asetukseen kuten mittapaloja. Esimerkiksi sisämittauslaitteet, kuten kolmipistemikrometri, on helpoin asettaa rengastulkin avulla. Tulkkeja on sekä kiinteitä, joilla voidaan tarkastaa vain tiettyä mitta, että asetettavia, joilla voidaan tarkastaa useampia mittoja. Asetettavat tulkit täytyy nimensä mukaan asettaa tarkastettavaan mittaan esimerkiksi tappitulkillla, mittapaloilla tai asetus- / pituudenmittauskoneella. [6] & [11]

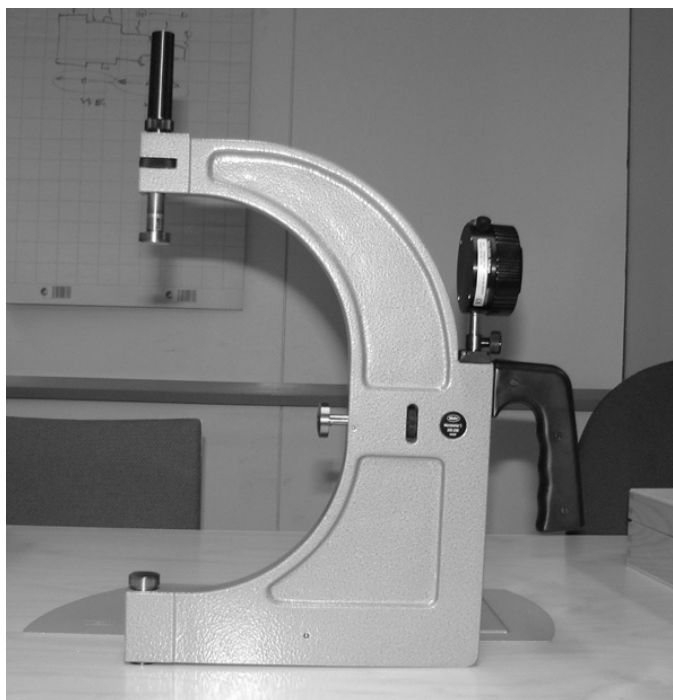
Akseleiden tarkastus Taylorin periaatteen mukaan tai ns. verhopintavaatimuksen toteutuminen tarkastetaan tulkkien avulla. Verhopinnanvaatimus on esitelty kappaleessa 3.2 Toleranssien välinen riippuvuus. Taylorin periaatteen mukaan ainetta poistavalla menetelmällä työstettäessä ensin vastaantuleva toleranssiraja tarkastetaan rengastulkilla, joka on yhtä pitkä kuin akseli. Näin akselin halkaisija tulee tarkastettua koko akselin matkalta. Sitten vähimmäismateriaalin raja tarkastetaan esimerkiksi kitatulkilla. Reiän tarkastus Taylorin mukaan noudattaa samoja periaatteita. Ensimmäisen tehdään menorajan tarkastus reiän mittaisella tappitulkilla, kerralla koko matkalta. Tämän jälkeen sauvatulkilla mitataan hylkyraja, ettei kahden pisteen välinen etäisyys ole liian suuri. [6] & [13]

Tulkit ovat yksinkertaisia mittausvälineitä ja niiden käyttö on suhteellisen helppo omaksua lyhyellä koulutuksella. Tulkilla mittaamista voidaan pitää helpompana ja nopeampana kuin esimerkiksi mikrometrillä mittaamista. Kuitenkin tulkkien kalibrointi tai asetus vaatii ammattitaitoa. Yleisesti tulkeilla ei saada mittaustulokseksi lukuarvoa, vaan ainoastaan se, onko kappale hyväksyttävä vai hylättävä. Asetettavilla mittaavilla tulkeilla voidaan saada myös numeerinen mittaustulos, joka kertoo mittaustuloksen poikkeaman asetetusta mitasta.

2.7.5 Hakatulkki

Hakatulkkeja on sekä asetettavia että kiinteitä. Kiinteät on tarkoitettu tietyn mitan tarkastamiseen ja soveltuvat hyvin sarjatuotantoon. Asetettavat hakatulkit nimensä mukaan asetetaan johonkin tiettyyn mittaan, johon mitattavaa kappaletta sitten hakatulkilla verrataan. Mittaustulokseksi saadaan erotus asetettuun mittaan. Hakatulkki täytyy asettaa lähelle mitattavan kappaleen mittaa ja poikkeaa näin mikrometrin nollakohdan asettamisesta. [11]

Kuvassa 2.7.7 on Mahrin asetettava hakatulkki, jonka mittaalue on 200 – 250 mm. Oikealla kahvan yläpuolella on mittakello, josta mittaustulos nähdään. Mittaaminen hakatulkilla on hyvin yksinkertaista ja nopeaa. Myös mittaustulosten keskihajonta on pieni (alle 1 µm) mittausta toistettaessa samalla asetuksella. Mittaalue yhdellä asetuksella on kuitenkin melko pieni (n. 0,7 mm). Tämä tarkoittaa, että jokaiselle mitattavalle halkaisijalle tarvitaan oma mittanormaali. Mittapalojen avulla asettaminen onnistuu mihin tahansa mittaan, mutta tuotantokäytössä mittapalat ovat hitaita ja hankalia käyttää. Yksi vaihtoehto kiinteiden mittanormaalien lisäksi on asetus- tai pituudenmittauskone. [11]



Kuva 2.7.7 Asetettava hakatulkki mallia Mahr marameter 840 FS.

Mahrin lisäksi asetettaville hakatulkeille on myös muita valmistajia. Yksi mielenkiintoisin on Kordt, jonka Cordameter-mittauslaitteessa on sama 50 mm:n mittausalue kuin Mahrilla, mutta yhdellä asetuksella mittausalue on 10 mm. Tämä mahdollistaa laitteen laajemman käytön tuotannossa.

2.7.6 Mittakellot

Mittakelloja käytetään pienten pituuksien ja pituuserojen mittaamiseen. Mekaanisissa mittakelloissa karan lineaariliike muutetaan koneiston avulla osoittimien pyöriväksi liikkeeksi ja jousi koneistossa tuottaa mittausvoiman. Mittausvoiman suuruus on tavallisesti 0,8..1,5 N, jossa sallitaan 0,4...0,8 N:n vaihtelu mittausalueella. Nykyisin mittakelloja on myös sähköisillä antureilla, joissa mittausulos on luettavissa digitaaliselta näytöltä. Kuvassa 2.7.8 Mitutoyon mekaaninen mittakello, jossa on toinen pienempi osoitin, joka kertoo sadasosaosoittimen kierrokset. Mittakelloissa voi myös olla hienojakoisempia asteikoita, aina 0,2 μm asti. [6]



Kuva 2.7.8 Mitutoyon mekaaninen mittakello [10]

Yleisesti mittakelloa käytetään statiiviin kiinnitettynä ja onkin tärkeää, että kiinnitys on riittävän tukeva. Liian heikko kiinnitys taipuu mittaussuunnan vaikutuksesta, ja jos mittaussuunta vaihtelee, muuttuu mittakellon asento ja mittaustuloksiin syntyy virhettä. Toinen mahdollinen virhelähde on liian suuri kiinnitysvaara karan ympärille tulevasta kiinnitysholkista, joka voi estää karan vapaan liikkeen. Mittakellon koneisto on tärkeää pitää ehjänä välttämällä mittauskärkeen tulevia iskuja, sekä puhtaana ja varoa, ettei esimerkiksi lastuamismateriaali pääse kellon sisälle. [6] & [7]

2.8 Koordinaattimittaus

Koordinaattimittaus mahdollistaa geometrinen muotojen mittaamisen. Alihankinnan osuuden kasvaessa yrityksen osavalmistuksesta geometrinen toleranssien mittaaminen, yhdessä mittatoleranssien kanssa, takaavat osien vaihtokelpoisuuden. [24]

Koordinaattimittaus on yksittäisten pisteiden paikan määrittästä avaruudessa. Mitatuista pisteistä koneeseen liitetty tietokoneohjelmisto muodostaa elementtejä, joita voidaan sitten tarkastella. Mahdollisia pisteistä muodostettavia elementtejä ovat mm. sylinteri, ympyrä ja taso. Nykyisistä koordinaattimittauskoneista tulokset saadaan suoraan tietokoneelle sähköiseen muotoon, joka helpottaa myös tulosten dokumentointia ja laatuanalyysien kuten SPC (Statistical Process Control) tekoa. [6] & [20]

Jotta perusgeometria voidaan määrittää yksiselitteisesti, niille on olemassa matemaattiset minimipistemäärät, kuten suoralle kaksi pistettä ja tasolle 3 pistettä. Koordinaattimittauksessa nämä matemaattiset minimipistemäärät täytyisi aina ylittää, jotta voidaan laskea mahdolliset poikkeamat pisteiden välillä. Kun mitattuja pisteitä on riittävästi, voidaan ns. huonoja pisteitä suodattaa pois ja mittauksen tarkkuus parane. [6]

Geometriatoleranssien tarkastamiseen koordinaattimittaus on lähes ainoa vaihtoehto. Joitain geometrisiä toleransseja voidaan mitata myös perinteisesti tasomittauksena mittaustasolla pystymittauslaitteen avulla. Tämä on kuitenkin koordinaattimittauskoneetta huomattavasti työläämpi mittausmenetelmä. Koordinaattimittauskoneet ovat hyvin monipuolisia mittausvälineitä, joilla voidaan mitata hyvin monenlaisia geometrioita. Erilaiset ohjelmistot mahdollistavat kierteiden, hammaspyörien tai erilaisten kaksoiskaarevien pintojen mittaamisen. [6] & [20]

2.8.1 Koordinaattimittauskoneityypit

Koordinaattimittauslaitteita on nykyään hyvin monenlaisia. On koordinaattimittauskoneita, laserskannereita, laserseuraimia, monikamerakuvausta ja konenäköä sekä takymetrit ja GPS-paikannus. Sovellukset vaihtelevat mitattavan kappaleen koon, vaadittavan tarkkuuden, käytettävissä olevien resurssien ja kustannusten mukaan. [20]

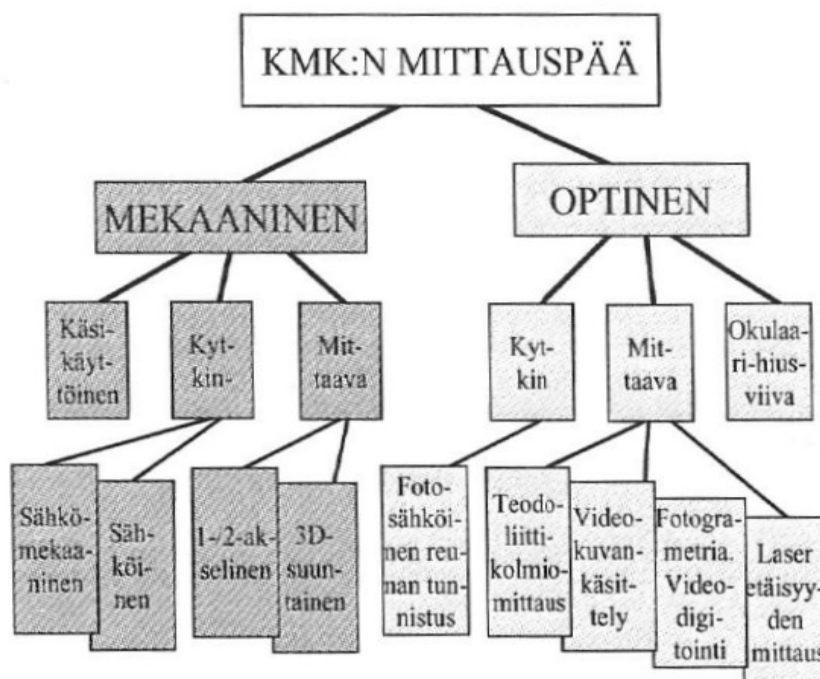
Koordinaattimittauskoneetkin voidaan jaotella monella tapaa mm. mittausmenetelmän mukaan: koskettava-, video- tai lasermittaus tai näiden yhdistelmä. Lisäksi jakoa voidaan tehdä rakenteen tai mittausalueen koon, mittausepävarmuuden, ohjelmistojen, automaation tai suunnitellun käyttöympäristön mukaan. Koneet voivat olla käsikäyttöisiä, moottoroituja tai NC-ohjattuja. Perinteiset koordinaattimittauskoneet ovat portaali-, silta-, pylväs- tai puomityyppisiä, joissa on kolme vastakkain liikkuvaa akselia, joita pitkin mittauspäättä liikutetaan. Koneiden täytyy olla jäykkiä ja liikkeiden tarkkoja, joka johtaa usein hyvin raskaisiin konstruktioihin. Koordinaattimittauskoneiden koko vaihtelee suuresti ja akseleiden liikematka voi vaihdella n. 300 mm aina 11 000 mm asti. [20] & [21]

Nykyisin yleistyneet nivelvarsikoordinaattimittauskoneet ovat puolestaan kevyitä ja niitä voidaan siirtää paikasta toiseen. Laitteen paino ilman tietokonetta on vain noin 10 kg. Varrella on 6-7 vapausastetta ja jokaisen nivelen kulma-asennosta ohjelma laskee mittauskärjen paikan. Nivelvarret eivät ole koneellisesti ohjattuja vaan niitä siirrellään käsin. Varsia on eripituisia ja ne mahdollistavat kohtuullisen suurenkin kappaleen mittaamisen. Mittausalueen halkaisija voi olla lähes 4 m. Tosin pitkä varsi myös kasvattaa aina mittausepävarmuutta. Lisäksi varret soveltuvat hyvin tehdasolosuhteisiin, koska ne on tehty lämpötilan kannalta mahdollisimman stabiileiksi. Nivelvarsimittauskoneet kuitenkin häviävät jonkin verran tarkkuudessa perinteisille koordinaattimittauskoneille. [22] & [20]

2.8.2 Mittauspää

Mittauspään avulla kerätään tietoa mitattavasta kappaleesta. Kone voi olla varustettu erilaisilla ja nykyään myös eri valmistajien mittauspäillä. Mittauspäissä oleva

mittausanturi voi olla joko koskettava tai optinen mittauspää. Kuvassa 2.8.2 on erilaisten mittauspäiden jako mekaanisiin ja optisiin mittauspäihin. [20]



Kuva 2.8.2 Koordinaattimittauskoneiden mittauspäiden jako mekaanisiin/koskettaviin ja optisiin. [20, s. 34]

Kytkevällä mittauspäällä on vain kaksi asentoa – päällä tai pois. Se ilmaisee, kun mittauskärki osuu kappaleeseen ja kärki poikkeaa nolla-asennostaan. Mittaava mittauspää taas pystyy mittaamaan kärjen poikkeaman suuruutta mielivaltaiseen suuntaan. Mittaavalla päällä voidaan tehdä myös ns. scanning eli pyyhkäisymittauksia, jolloin mittaavaa kärkeä kuljetetaan kappaleen pintaa pitkin. Tällä tavoin voidaan kerätä suuri määrä tietoa kohtuullisen nopeasti. Menetelmä soveltuu hyvin mm. kappaleen muotovirheiden mittaamiseen. [6]

2.8.3 Laserseurain

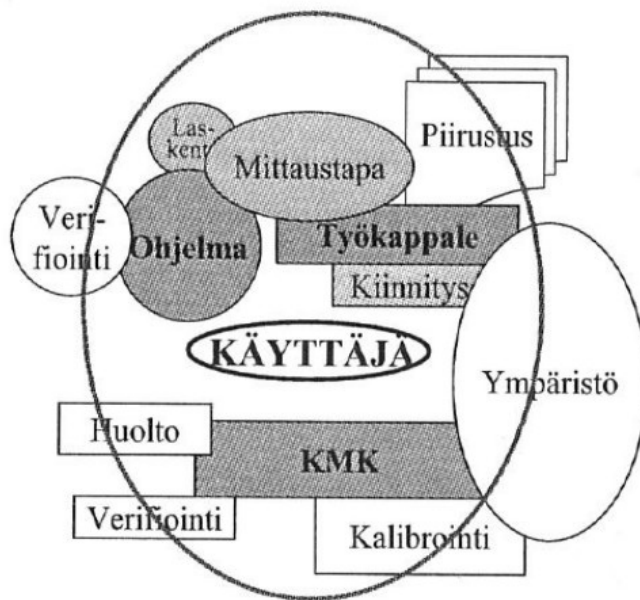
Lasertrackerit eli laserseuraimet ovat liikuteltavia koordinaattimittauslaitteita. Laserseuraimet soveltuvat hyvin suurten kappaleiden mittaamiseen ja laite voidaan viedä mitattavan kohteen luokse. Mittausalue voi olla jopa yli 100 m, jolloin voidaan tarkastella kaukana toisistaan olevien elementtien suhteita toisiinsa. Laserseuraimen mittaustarkkuus ei kuitenkaan ole yhtä hyvä kuin tavallisten kiinteiden koordinaattimittauskoneiden, mitattaessa pieniä kappaleita. [23]

Laserseurain on laserinterferometri, jonka lähettämän lasersäteen mittauspää heijastaa takaisin. Näin voidaan mitata heijastimen etäisyys laitteesta. Lasersäde seuraa mittauspäätä kääntyvien peilien avulla. Peilin kulmatietojen ja etäisyyden avulla

laserseurain määrittää mittauspään paikan avaruudessa. Tavallinen mittauspää on pyöreä pallo, jonka sisällä heijastin on. Laitteen ohjelmisto osaa korjata mittaustuloksista pallon säteen. Leican laserseuraimeen on saatavilla antureita, joilla voidaan mitata myös jonkin verran kulman takana, lasersäteen ulottumattomissa, olevia elementtejä. Tai laserskanneri, jolla voidaan skannata suuria pintoja. [23]

2.8.4 Mittauskyky

Koordinaattimittauskone ei ole ainoa epävarmuustekijä koordinaattimittauksessa, vaan hyvin moni asia vaikuttaa mittaustulokseen. Konetta käyttävän mittaajan kyky hallita kokonaisuutta on tärkeää mittauskyvyn kannalta. Mittaajan täytyy valvoa mittauskonetta ja tarkkailla ympäristöä ja siinä mahdollisesti tapahtuvia muutoksia. Jotta ympäristön vaikutukset mittaustulokseen voidaan minimoida, mittauskoneet sijoitetaan usein erilliseen mittaustilaan, jonka lämpötilaa, ilmankosteutta ja muita tekijöitä voidaan kontrolloida. Mittaajan on tehtävä mittaustekniset ratkaisut siitä, kuinka kappale kiinnitetään, mitä mittauspäitä käytetään ja miten kappale mitataan. Mittaustavalla voi olla huomattava vaikutus mittauksen epävarmuuteen. Peruselementtien laadulla ja suuntauksella on suuri vaikutus mittausepävarmuuteen ja siihen on hyvä kiinnittää huomiota. [20]



Kuva 2.8.4 Koordinaattimittaukseen osaltaan vaikuttavat tekijät. [20, s. 38]

Koordinaattimittauskoneille ilmoitetaan usein pituudenmittauksen maksimivirhe MPE (maximum permissible error), jotka annetaan kattavuuskertoimella $k = 2$, eli 95 % luottamusvälillä. Maksimivirhe ilmoitetaan muodossa $MPE = A + L / K < B$. MPE on muotoa \pm , vaikkei etumerkkiä usein esitetä. A on kaavan vakio-osa ja L / K kuvaa

mittauspituudesta riippuvaa virhettä. A annetaan $\mu\text{m:nä}$ ja L voidaan ilmoittaa mm tai m. B on arvo, jota virhe ei ylitä. Nykyään arvo tarkoittaa mihin suuntaan tahansa tehtyä mittausta, eikä vain yhden tai kahden akselin suuntaista liikettä. MPE ei ilmaise koneella tehdyn mittauksen epävarmuutta suoraan, mutta on hyvä lähtökohta epävarmuuden määrittämiselle. [20] & [32]

3 TOLERANSSIT

Toleranssi tarkoittaa rajoja, joiden sisällä suureen tai ominaisuuden on oltava, jotta tuote on käyttökelpoinen. Toleroida voidaan mikä vain tunnistettava ja mitattava ominaisuus, mutta koneenrakennuksessa keskeisiä ovat mittatoleranssit, geometriatoleranssit ja pinnankarheus. Tolerointi perustuu usein suunnittelijan kokemukseen ja yrityksen vakiintuneisiin käytäntöihin. Useinkaan toleranssien vaikutukset tuotantokustannuksiin tai tuotannon kyky täyttää asetetut vaatimukset eivät ole keskeisiä kriteereitä toleroitaessa. [6]

Toleranssit mahdollistavat osien vaihdettavuuden. Koska täysin oikeaa mitta ei voida valmistuksessa saavuttaa, riittää laitteen toiminnan takaamiseksi, että mitta on sallittujen rajojen välissä eli toleranssin sisällä. Toleranssialueen suuruus määräytyy sovitteen toiminnallisten vaatimuksien mukaan. [15]

3.1 Käsitteitä

Mittaelementti on geometrinen muoto, jonka määrittelee pituus- ja kulmamitta. **Rakenteellinen elementti** on jollain pinnalla oleva pinta tai viiva ja **laskennallinen elementti** yhden tai usean rakenteellisen elementin keskipinta, keskiviiva tai keskipiste. **Menoraja** on tila, jossa mittaelementti on kokonaisuudessaan siinä rajamitassa, missä sen materiaali on maksimissaan, eli esimerkiksi akselille sen maksimihalkaisija. [14]

Toleranssi on ylemmän rajamitan ja alemman rajamitan välinen erotus. **Toleranssirajat** ovat ominaisuudelle määrätyt rajat, joiden välissä sen arvon on oltava. **Vällys** on akselin ja reiän mittojen erotus silloin, kun akselin halkaisija on reikää pienempi. **Ahdistus** puolestaan on reiän ja akselin koon välinen erotus ennen yhdistämistä, kun akselin halkaisija on reikää suurempi. **Sovite** on kokoonpantavien ulko- ja sisäpuolisten mitallisten elementtien välinen suhde. [15]

3.2 Toleranssien välinen riippuvuus

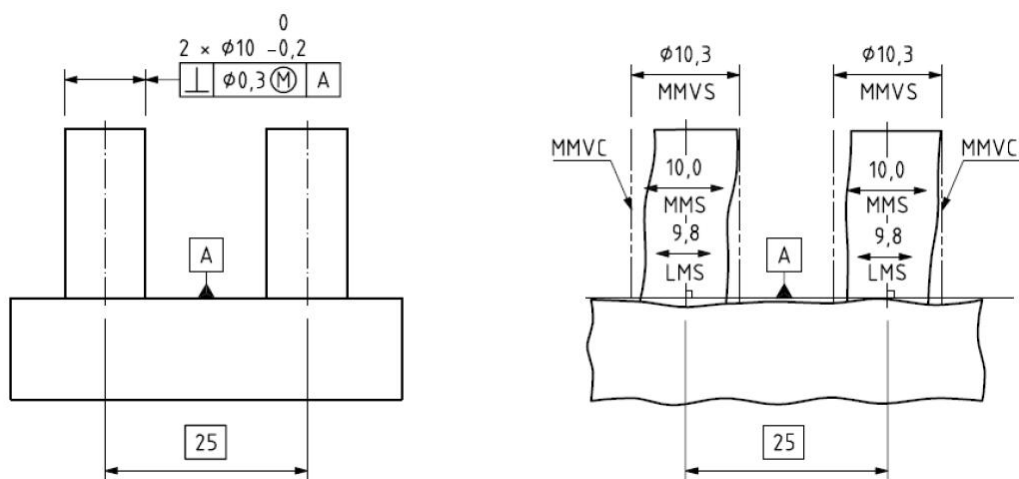
Piirustuksissa esitettävät mittatoleranssit ja geometriatoleranssit eivät ole riippuvaisia toisistaan, ellei niin ole erikseen määrätty. Pituusmitalle annettu toleranssi rajoittaa vain elementin paikallista mitta, muttei aseta rajoituksia muoto-poikkeamille. Geometriatoleranssit asettavat vaatimukset kappaleen muodolle, suunnalle tai sijainnille riippumatta kappaleen koosta ja yksittäisen elementin todellisista paikallisista mitoista.

Kaikki geometriset poikkeamat tarkastellaan erikseen riippumatta siitä, onko muut elementit menorajoissaan. [13]

Kappaleen koon ja geometrian riippuvuus saadaan aikaan tekemällä mitoitus - verhopintavaatimus tai standardissa SFS-EN ISO 2692:2007 määriteltyjen käsitteiden - maksimimateriaalin vaatimus (MMR), vähimmäismateriaalin vaatimus (LMR) ja vastavuoroinen materiaalivaatimus (RPR) - avulla. Maksimimateriaalin vaatimus korvaa vanhan standardin menorajan periaatteen, mutta menoraja-termi on käytössä uudessakin standardissa. Verhopintavaatimusta voidaan soveltaa lieriömäiseen pintaan tai kahden yhden suuntaisen tasopinnan muodostamaan elementtiin. Verhopintavaatimuksen mukaan ei teoreettisesti oikean muotoinen ja elementin menorajan mukainen verhopinta saa ylittyä, eli kappaleen on mentävä kokonaan oikeanmuotoisen verholieriön sisään. Verhopinnanvaatimuksen tunnus piirustuksissa on ympyröity E-kirjain, joka tulee mittatoleranssin jälkeen. [13] & [14]

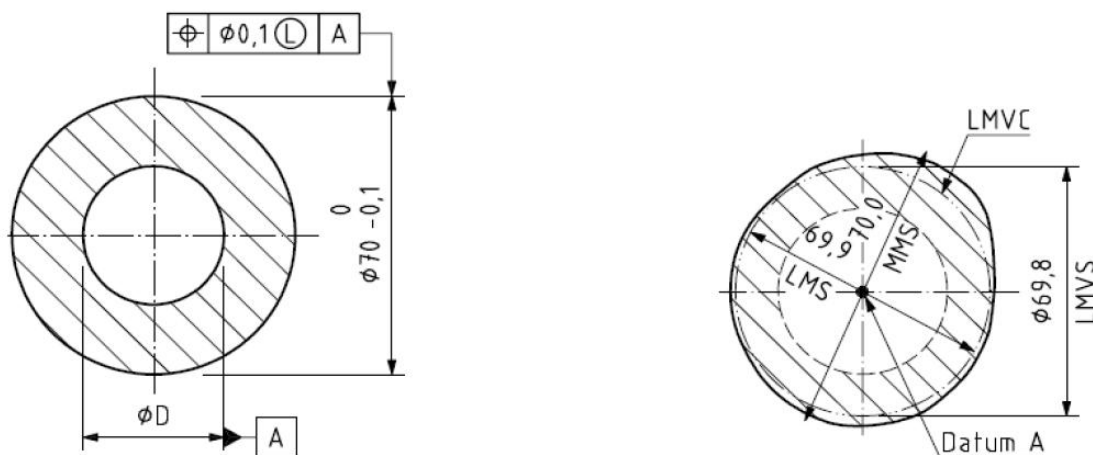
Maksimimateriaalin vaatimus (tunnus ympyröity M-kirjain) takaa kappaleen kokoonpantavuuden, vaikka kappaleiden vastaelementit ovat menorajassaan (esim. suuri akseli ja pieni reikä) ja geometriapoikkeamat (esim. muoto ja paikka) olisivat maksimissaan. Kun mittaelementtien mitat ovat mahdollisimman kaukana menorajoistaan eikä geometrisia poikkeamia ole, on kokoonpanovälitys suurimmillaan. Yllä oleva mahdollistaa geometriatoleranssien ylittämisen, jos mittaelementit eivät yllä menorajaansa, ilman että kokoonpantavuus vaarantuu. [14]

Kuvassa 3.2 olevassa piirustuksessa esitetään kaksi halkaisijaltaan 10 mm tappia, joiden on oltava 25 mm etäisyydellä toisistaan ja kohtisuorassa peruselementtiä A vastaan. Tappien halkaisijoiden on oltava toleranssin mukaiset ja tappien on mahdollista maksimimateriaalin vaatimuksen mukaan 10,3 mm lieriön sisään. Tapin kohtisuoruuspoikkeama saa kuitenkin olla halkaisijasta riippuen välillä 0,3–0,5 mm. [16]



Kuva 3.2 Esimerkki maksimimateriaalin periaatteen käytöstä. [16]

Vähimmäismateriaalin vaatimus (tunnus ympyröity L-kirjain) pitää huolen kappaleen seinämän paksuudesta. Vaatimuksen mukaan geometriatoleranssi saa ylittyä, jos mittatoleranssin mitta ei ole vähimmäismateriaalinmitassaan, kunhan seinämäpaksuus pysyy vaadittuna. Kuvassa 3.3 olevan holkin ulko- ja sisähalkaisijoiden on oltava samankeskeisiä. Ulkohalkaisijan on oltava toleranssin mukaisissa mitoissa, mutta riippuen halkaisijan mitoista samankeskeisyyspoikkeama voi olla 0,05–0,1 mm säteellä. [14] & [16]



Kuva 3.3 Vähimmäismateriaalin vaatimus. [16]

Vastavuoroinen materiaalivaatimus (tunnus ympyröity R-kirjain) mahdollistaa, että mittatoleranssi voi ylittää toleranssialueensa rajat, jos geometriatoleranssin poikkeamat eivät ole maksimissaan, ja kunhan vaihtokelpoisuutta tai minimeinämävahvuutta ei loukata. Vastavuoroisuuden vaatimus on aina liitettyä maksimi- tai vähimmäismateriaalin vaatimukseen. [14] & [16]

Standardin SFS-EN ISO 2692:2007 hyödyntämisestä on mahdollista saavuttaa säästöjä tuotantokustannuksissa. Kun suunnittelu on määrittänyt kappaleiden keskinäisiin suhteisiin ja itse kappaleisiin kohdistuvat vaatimukset, ja ne on merkitty piirustuksiin, on tilanne mittausten kannalta hyvin selkeä. Jos kappale täyttää vaatimukset, on se kokoonpantavissa vaihtokelpoisesti ja mitoituksen asettamat lujuusvaatimukset täyttyvät. Jollei kappale täytä näitä vaatimuksia, joko vaihtokelpoisuus tai lujuusvaatimus ei täyty. Standardin hyödyntäminen kasvattaa valmistuksessa käytössä olevia toleransseja lähes poikkeuksetta, joka helpottaa mittausta ja vähentää tarpeetonta tuotteiden hylkäystä. Standardi myös mahdollistaa toiminnallisten tulkien käytön, mikä on varsinkin sarjatuotannossa varma ja helppo tapa mitata kappale. [16]

3.3 Pituusmittojen toleranssit

Toleroitu pituusmitta on, standardin ISO 14405-1 mukaan, vain kahden pisteen välinen paikallinen mitta. Jotta kaksi kappaletta voidaan sovittaa yhteen, on liitoselementtien välillä oltava sopiva sovite. Sovite määräytyy nimellismittaan lisättävällä positiivisella tai negatiivisella lisämitalla, jolla saavutetaan haluttu välys tai ahdistus. Sovitteen elementtien nimellismittojen on oltava identtisiä, jotta ISO-standardijärjestelmän mukaisia pituusmitan toleransseja voidaan soveltaa. Standardi ISO 286 määrittelee toleranssi- ja eromittajärjestelmän kahdelle mitalliselle elementtityypille: lieriö ja kaksi yhdensuuntaista vastakkaista pintaa. Tyypillisiä lieriötyyppisiä mitallisia elementtejä on akseli ja reikä. [15]

Mitallisen elementin toleranssi voidaan esittää kahdella tavalla, joko standardissa ISO 286 määritellyllä ISO-merkintäjärjestelmällä tai standardin ISO-14405-1 mukaisella + ja – -merkinnällä, joka kertoo rajojen eron nimellismittaan. Standardin ISO 286 merkintäjärjestelmä perustuu toleranssiluokkiin, jotka pitävät sisällään tiedon toleranssin suuruudesta ja asemasta elementin nimellismittaan. Toleranssin suuruus on toleranssiasteen numeron ja elementin nimellismitan välinen funktio. Perustoleranssiasteen merkintä on IT ja asteen numero, esim. IT9. Toleranssivälin aseman suhteesta nimellismittaan kertovat ylä- ja alarajamitta. Tieto toleranssivälin asemasta ilmaistaan yhdellä tai useammalla kirjaimella, ns. perusmitan tunnuksella. Perusmitta on nimellismittaa lähempänä oleva rajaeromitta. Perusmitan tunnukset rei'ille on suuraakkoset (A...ZC) ja akseleille pienaakkoset (a...zc). Toleranssiluokan merkintä sisältää siis peruseromitan määrittävän kirjaimen ja perustoleranssiasteen osoittavan numeron, esimerkiksi H7 (reikä) tai h7 (akseli). [15]

Perustoleranssiasteiden ja peruseromittojen lukuarvot ovat saatavilla ainakin standardin SFS-EN ISO 286 lopussa taulukoista. Lisäksi standardissa on ohjeet sovitteiden suunnitteluun. Sovite voidaan määritellä joko kokemuseräisesti tai laskennallisesti ottaen huomioon sovitteen toiminnalliset ja valmistukselliset vaatimukset. [15]

3.4 Geometriatoleranssit

Kappaleilla on sekä materiaaliominaisuuksia että geometrisia ominaisuuksia. Teknisissä piirustuksissa tuotteen geometrisia ominaisuuksia määritellään GPS:n (geometrinen tuotemäärittely, englanniksi Geometric Product Specification) avulla. Myös pituusmitat ja niiden toleranssit ovat osa tätä järjestelmää, vaikka niitä on käsitelty tässä työssä osittain erillään. Tätä varten on luotu maailmanlaajuinen GPS-järjestelmä, jossa määritellään piirustuksissa tarvittavat spesifikaatio-operaattorit ja niiden symbolit. Tuotteen piirustuksissa vaaditut spesifikaatio-operaattorit varmennetaan mittaamalla ja vertaamalla mitattua arvoa mittaussuureelle määriteltyyn arvoon/toleranssiin. [17]

Jos piirustuksissa otetaan käyttöön osa GPS-järjestelmää tarkoittaa se sitä, että koko järjestelmä tulee käyttöön. Järjestelmän mukaan kaikki vaadittavat ominaisuudet on määriteltävä selkeästi piirustuksissa. Jollei näin ole, ei vaatimus ole voimassa, eikä sitä näin ollen voida vaatia. Tämä on erityisen tärkeää ottaa huomioon kun osavalmistusta teetetään alihankkijoilla. Pituusmittojen toleranssit eivät aseta vaatimuksia kappaleen muotopoikkeamille. [17]

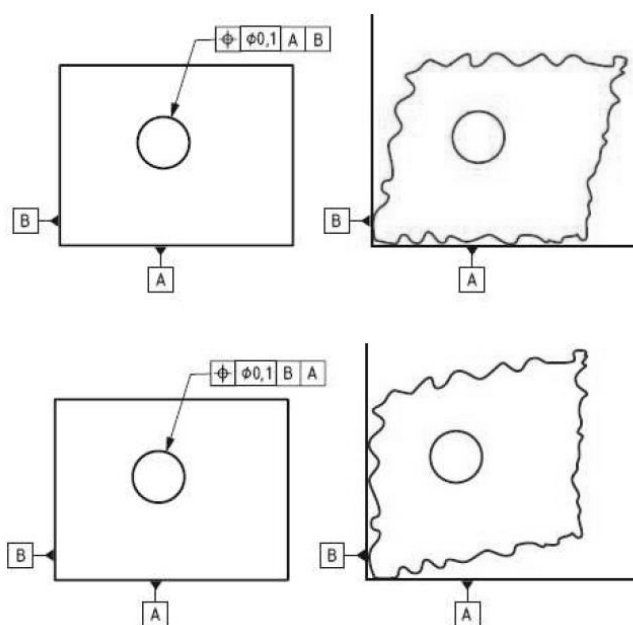
Geometrinen kappale voidaan jakaa geometrisiksi peruselementeiksi, kuten tasoihin ja lieriömäisiin elementteihin. Geometriset vaatimukset esitetään joko yksittäisille elementeille tai kahden elementin väliselle suhteelle. Geometristen elementtien lisäksi on olemassa myös virtuaalisia laskennallisia elementtejä, esimerkiksi lieriön akseli tai ympyrän keskipiste, joita kappaleessa ei oikeasti ole. [17] Johonkin kappaleen elementtiin liitetty geometrinen toleranssi määrittelee toleranssialueen, jonka sisään elementin on mahdollista. Jollei muita rajoituksia ole annettu, toleroitu elementti voi olla minkä muotoinen tahansa toleranssialueen sisällä. [18]

Muototoleransseille ei määritellä peruselementtiä. Kaikki muut taulukossa 3.4 mainitut geometriatoleranssit täytyy määritellä peruselementin suhteen. Paikkatoleranssilla voidaan tosin rajoittaa elementtien suhteita myös muihin kuin peruselementteihin. Elementille peruselementin suhteen määritellyt toleranssit eivät rajoita itse peruselementtiä. Usein on tarpeen käyttää muototoleransseja myös peruselementille. Peruselementti on tärkeä mittausten kannalta ja huonolaatuinen peruselementti aiheuttaa ongelmia valmistuksessa sekä mittauksessa suuntaukselle kasvattaen mittausepävarmuutta. [18] & [33]

Taulukko 3.4 Geometristen ominaisuuksien tunnuksat. [17]

Toleranssit	Ominaisuus	Tunnus
Muoto	Suoruus	—
	Tasomaisuus	▭
	Ympyrämuotoisuus	○
	Lieriömuotoisuus	⊂
	Tasoviivan muoto	⌒
	Pinnan muoto	⌒
	Pinnan muoto	⌒
Suunta	Yhdensuuntaisuus	//
	Kohtisuoruus	⊥
	Kulma-asento	∠
	Tasoviivan muoto	⌒
	Pinnan muoto	⌒
Toleranssit	Ominaisuus	Tunnus
Sijainti	Paikka	⊕
	Samankeskisyys (keskipisteille)	⊙
	Sama-akselisuus (akseleille)	⊙
	Symmetrisyys	≡
	Tasoviivan muoto	⌒
Heitto	Pinnan muoto	⌒
	Heitto	↗
	Kokonaisheitto	↗↗

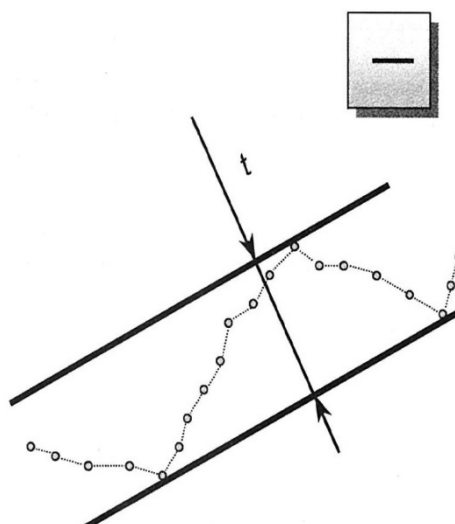
Geometritoleranssit esitetään piirustuksissa suorakaiteen muotoisissa kehyksissä, joissa voi olla useampikin ruutu. Kehyksessä on ensin geometrisen ominaisuuden tunnus, jonka jälkeen toleranssin lukuarvo ja sitten mahdollisen peruselementin tai peruselementtijärjestelmän kirjain tai kirjaimet, kuten kuvan 3.4 yläreunassa. Jos yhdelle elementille annetaan useamman geometrisen ominaisuuden toleranssi, voidaan ne sijoittaa allekkain. Toleranssikehys tulee yhdistää viiteviivalla toleroituun elementtiin piirustuksissa. Peruselementin viitekirjain merkitään myös kehyksen sisään isolla kirjaimella ja yhdistetään peruselementin kolmioon. Kolmio tulee yleensä sijoittaa elementin muotoviivalle tai sen jatkeelle tai mittaviivan jatkeelle, kuten kuvassa 3.4. Jos peruselementtiä osoittava kolmio on pinnalla, koskee vaatimus pintaa. Jos kolmio on sijoitettu mittaviivan jatkeelle, koskee vaatimus virtuaalista akselia tai pistettä. [18]



Kuva 3.4 Peruselementin ja geometritoleranssin merkintä piirustukseen. [17]

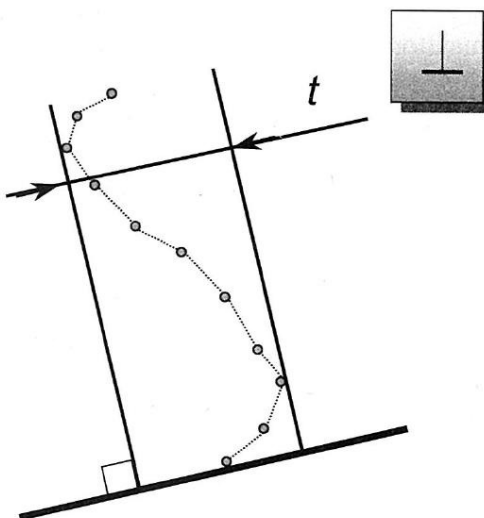
3.4.1 Toleranssialueiden määritelmää.

Suoruustoleranssin toleranssialuetta rajoittaa kaksi yhdensuuntaista suoraa joiden etäisyys on t ja suunta määrätty, kuva 3.4.1. Avaruuskäyrän toleranssialueen muodostaa kaksi yhdensuuntaista tasoa, joiden etäisyys toisistaan on t (t on toleranssialue). [18]



Kuva 3.4.1 Suoruus. [6]

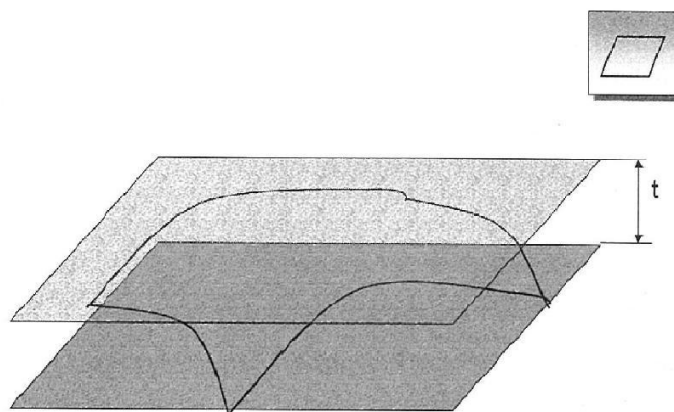
Kohtisuoruustoleranssi vertaa arvioitavaa elementtiä peruselementtiin. Toleranssialueen muodostaa kaksi yhden suuntaista suoraa, kuten kuvassa 3.4.2, tasoa, lieriötä tai suorakulmaista särmiötä, joiden keskinäinen etäisyys on t ja ne ovat kohtisuorassa perustasoa vastaan. [6] & [18]



Kuva 3.4.2 Kohtisuoruus. [6]

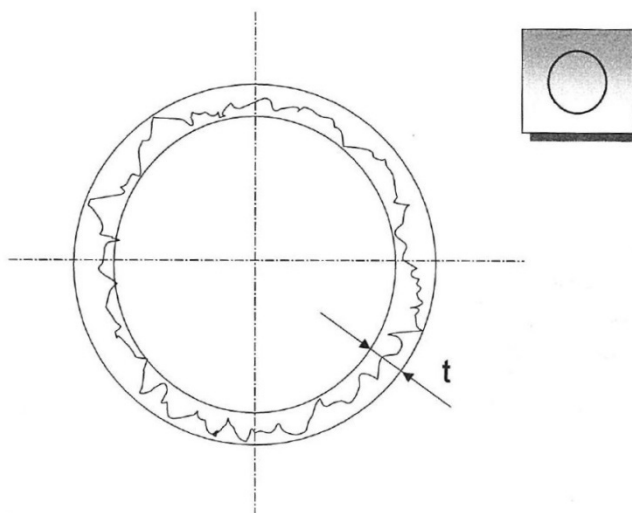
Yhdensuuntaisuustoleranssin toleranssialueen muodostavat kaksi yhdensuuntaista tasoa, joiden etäisyys on t ja tasot ovat yhdensuuntaisia peruselementin kanssa. [18]

Tasomaisuustoleranssin toleranssialuetta rajoittaa kaksi yhdensuuntaista tasoa, joiden keskinäinen etäisyys on t , kuva 3.4.3. [18]



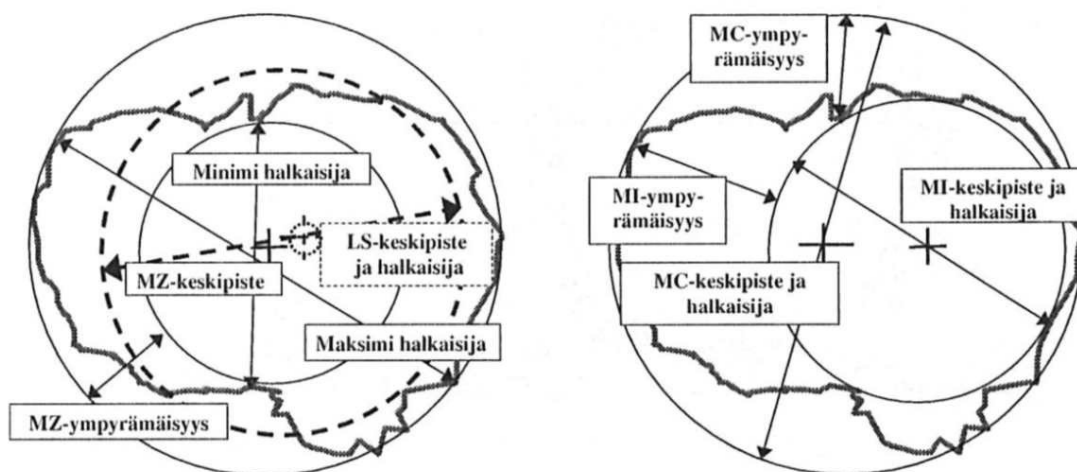
Kuva 3.4.3 Tasomaisuus. [6]

Ympyrämäisyystoleranssin toleranssialuetta rajoittaa kaksi samassa tasossa olevaa ympyrää, jotka ovat samankeskeisiä, ja joiden säteittäinen etäisyys on t , kuva 3.4.4 [18]



Kuva 3.4.4 Ympyrämäisyys. [6]

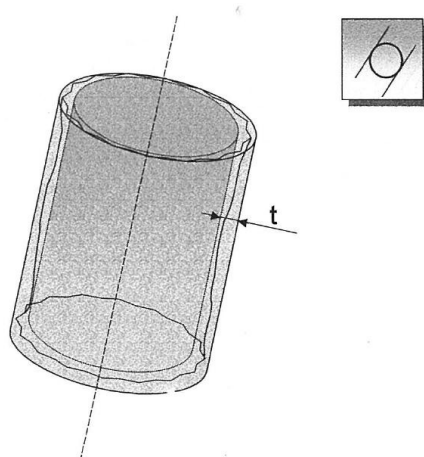
Ympyrämäisyys voidaan mitata kaksi- tai kolmepistemittauksin, vertaamalla ympyrämäiseen profiiliin, mittaamalla koordinaatteja tai säteispoikkeama kiinteästä pisteestä. [6] Mittaamalla säteispoikkeama kiinteästä pisteestä tai skannaamalla koordinaattimittauskoneella saadaan suuri joukko pisteitä. Pisteistä voidaan laskea ympyrämäisyys neljällä erilaisella algoritmilla: MZ minimimuotovirhe, LS pienin neliösumma, MC pienin ulos piirretty ympyrä ja MI suurin sisään piirretty ympyrä. Menetelmien nimet kuvaavat hyvin myös sovitustapaa. Kuvasta 3.4.5. nähdään miten erilaisia tuloksia eri menetelmät voivat antaa. Jos muotovirhettä ei ole, antavat kaikki neljä menetelmää saman tuloksen. [20]



Kuva 3.4.5 Neljällä eri tavalla sovitetut ympyrät ja niiden halkaisijat, keskipisteet ja muotovirheet. [7 s. 26]

Minimimuodon menetelmä (MZ) antaa pienimmän muotovirheen ja on standardin ISO 1101 määritelmän mukainen. Pienimmän neliösumman periaate (LS) on hyvin yleinen ja antaa kappaleen keskimääräisen paikan, aseman ja halkaisijan. Halkaisija on osittain kappaleen materiaalin sisällä muotovirheen suuruudesta riippuen. Menetelmä ei ole herkkä yksittäisille virhepisteille. Pienin ulos piirretty - tai suurin sisään piirretty ympyrä vastaavat hyvin tulkkausta ja ovat hyödyllisiä mm. kokoonpantavuuden selvittämiseksi. [20]

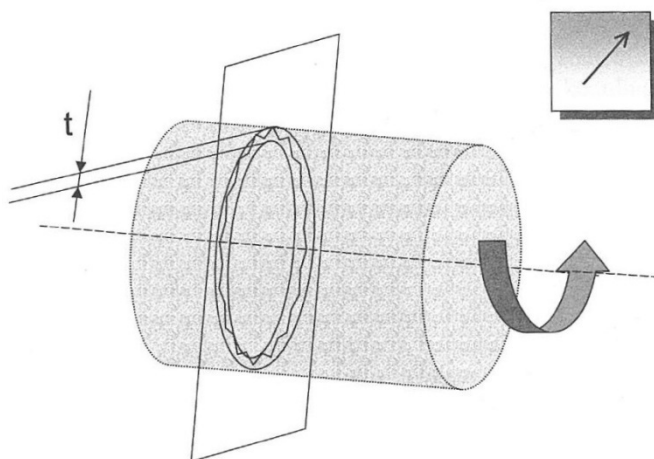
Lieriömaisyystoleranssin toleranssialuetta rajoittaa kaksi sama-akselista lieriöpintaa. Näiden säteittäinen etäisyys on t , kuva 3.4.6. [18]



Kuva 3.4.6 Lieriömaisyys. [6]

Heittotoleranssin toleranssialuetta rajoittaa perusakselin jokaisessa kohtisuorassa leikkauksessa kaksi samankeskeistä ympyrää, joiden keskipiste on perusakselilla.

Näiden ympyröiden säteiden välinen erotus on toleranssialue t , kuva 3.4.7. Heitossa yhdistyvät sekä muotovirhe että toleroidun elementin paikka peruselementtiin nähden. Heitto on merkittävä ominaisuus varsinkin pyöriville kappaleille, kuten akseleille. Kokonaisheittotoleranssin toleranssialuetta rajoittaa kaksi samanakselistä lieriötä, joiden keskiviiva yhtyy perusakseliin. [18]



Kuva 3.4.7 Heitto. [6]

4 TOLERANSSIEN ANALYSOINTI

Osana tätä diplomityötä toteutettiin Rolls-Royce Oy Ab:n Raumalla valmistamien osien toleranssien kriittisyyden analysointi. Analyysissä käytiin läpi Azimuth-potkurilaitteen ala- sekä ylärunko että potkuriakseli. Analyysin teki työryhmä, jossa oli mukana henkilöitä suunnittelusta, osavalmistuksesta ja diplomityöntekijä. Työn tavoite oli tunnistaa laitteen toiminnan kannalta kriittiset mitat ja toleranssit, sekä tarkastella vaadittujen toleranssien järkevyyttä ja paikallistaa mahdolliset tarpeettoman tiukat toleranssit valmistettavuuden ja mittauksen helpottamiseksi.

Työryhmä mahdollisti avoimen tiedonvaihdon suunnittelun ja tuotannon välillä, joten molemmat osapuolet saivat paremman käsityksen, mitkä ovat kriittisiä ominaisuuksia tuotteen toiminnan kannalta. Tuotannon edustajat pystyivät kertomaan, mitkä elementit ovat hankalia tai kalliita valmistaa ja suunnittelu sai perustella, mitkä syyt ovat johtaneet tiettyyn toleranssiin tai ratkaisuun. Yhteistyöllä suunnittelun ja tuotannon välillä saadaan aikaan valmistusystävällisempiä tuotteita ja saavutetaan tätä kautta kustannussäästöjä.

Esimerkkinä käytiin läpi laakerin paikoilta vaaditut mitta- ja muototoleranssit. Laakerin paikan mittatoleranssin ja vaaditun sovitteen määrittelee laakerin valmistaja, eikä niihin voi omassa suunnittelussa vaikuttaa. Mittatoleranssin lisäksi laakerin valmistaja asettaa vaatimukset myös reiän lieriömäisyydelle, mahdollisen laipan kohtisuoruudelle ja akselin linjan kokonaisuudelle. Nämä laakeritoimittajan vaatimukset on täytettävä, jotta toimittaja takaa laakereiden toimivuuden ja kestävyys.

4.1 FVRA-menetelmä

FVRA (Feature Verification Risk Analysis) on Rolls-Roycen sisäinen analyysi, jolla voidaan tarkastella tuotteen eri elementtien mahdollisten virheiden aiheuttamaa riskiä. Menetelmä on eräänlainen muunneltu Failure Mode Effects Analysis. Analyysin tavoite on tunnistaa, missä tuotteen määrittely ei ole riittävä tai valmistus- ja/tai tarkastusprosessia pitäisi kehittää. Analyysissä on kolme arvioitavaa osa-aluetta, jotka ovat elementin mahdollisen virheen aiheuttaman riskin vakavuus, todennäköisyys ja havaitseminen. Jokainen arvioitava osa-alue saa arvon 1, 5 tai 10, jonka jälkeen lasketaan arvojen tulo. 1 kuvaa pientä riskiä ja 10 suurinta. Tulosten perusteella voidaan arvioida tarvitseeko elementti jotain jatkotoimenpiteitä vai ei. [19]

Poikkeaman elementin mitoissa aiheuttaman riskin vakavuudelle (severity) arvioi työryhmän jäsen suunnittelusta. Suunnittelu osaa arvioida poikkeaman mahdollisesti aiheuttamien seurausten vakavuutta, jos tuote ei ole sille asetetuissa toleranssirajoissa. Vakavuusarvio perustetaan oletukseen, että elementin mitat ovat alueella, joka on sen toleranssialue kaksinkertaistettuna. Esimerkiksi jos heittotoleranssi on 0,1 mm, oletetaan heiton olevan enintään 0,2 mm. Muuten kaikki elementit voisivat olla 10 vakavuusluokan riskejä. 1 matalan luokan vakavuus ei aiheuta hajotessaan turvallisuus-, suorituskyky- tai rakenneongelmia. 5 luokan vakavuutta olevan elementin virhe voi aiheuttaa ongelmia kokoonpanossa ja ylimääräisen huolto-/korjauskerran laitteelle. 10 korkeimman luokan riski tekee tuotteesta käyttökelvottoman ja voi aiheuttaa varoittamattoman turvallisuusriskin. [19]

Todennäköisyyttä, jolla tuote täyttää vaatimukset (occurrence), arvioi sellainen tuotannon työntekijä, joka osaa arvioida valmistusprosessin laaduntuottokykyä. luku 1 tarkoittaa, että 100 % kappaleista on toleranssin mukaisia. luku 5 tarkoittaa, että yli 50 % on toleranssin sisällä ja luku 10, että alle 50 % kappaleista on määritettyjen toleranssien mukaisia. [19]

Poikkeaman havaitsemisen (detection) pisteet määrittelee tuotannon työntekijä yhdessä mahdollisen tarkastajan kanssa. luku kuvaa, miten helppo virhe on huomata tarkastuksessa tai kokoonpanossa. luku 1 tarkoittaa, että tarkastus on helppo suorittaa ja esimerkiksi mittaussäätimen mittaustarkkuus on alle 20 % elementin toleranssialueesta. luku 5 annetaan, jos mittaustarkkuus on suurempi kuin 20 % toleranssialueesta tai tarkastus on muuten hankalaa, mutta mahdollista. Korkein luku 10 annetaan, jos elementtiä ei voida tarkastaa ollenkaan luotettavasti. [19]

Kun tuotteen kaikki kriittiset elementit on arvioitu sekä suunnittelun, valmistuksen että tarkastuksenkin kannalta on tulokset analysoitava, jotta voidaan ryhtyä vaadittaviin toimenpiteisiin. Jos tuloksissa on jonkin elementin virheellisyyden todennäköisyys korkeimpaan (10) luokkaan, on tälle elementille löydettävä parempi valmistusmenetelmä tai ominaisuuden toteutukseen on löydettävä valmistusystävällisempi tapa. Muuten varsinkin vakavan riskin elementtien mittausta ja tarkastusta on syytä kehittää, jollei se ole nykyisin mahdollista, vaikka valmistus olisikin kyvykäs tuottamaan vaadittua laatua. [19]

4.2 Tulokset

4.2.1 Potkuriakseli

Taulukossa 4.2.1 on FVRA-tulokset potkurilaitteen potkuriakselille. Diplomityön aikana ei analysoitu muita akseleita, mutta tuloksia voidaan jossain määrin hyödyntää erilaisille akseleille, ainakin valmistuksen ja mittauksen osalta. Tällöin

toleranssialueiden on oltava samanlaisia ja valmistus- ja tarkastusprosessin yhteneviä. Riskin vakavuuden arviointi kohdistuu aina kyseiseen elementtiin, eikä sitä voida suoraan siirtää toisenlaiseen kappaleeseen.

Taulukko 4.2.1 Potkuriakselin FVRA-tulokset.

Feature Num	Eng Dim	Eng Lower Tol	Eng Upper Tol	Dimension Description	Feature Code	FVRA	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Status
1	195,75	-0,05	0,05	Akselinpää	DIAM		5	1	5	25	OK
2	220	-0,072	0	Tiivisteen paikka	DIAM		5	1	1	5	OK
3	220	0,050	0,079	Laakerin paikka	DIAM		10	5	5	250	Possible
4			0,03	Kokonaisheitto	RUNO		10	5	5	250	Possible
5			0,02	Heitto	RUNO		10	5	10	500	Possible
6			1,6	Pinnanlaatu	OTHR		5	5	1	25	OK
7			0,015	Lieriömäisyys	CYLI		5	10	10	500	NOT OK
8	240	0,416	0,445	Hammaspyörän paikka	DIAM		5	5	5	125	OK
9			0,015	Kokonaisheitto	RUNO		10	5	5	250	Possible
10	180	0,003	0,028	Painelaakeri	DIAM		10	5	5	250	Possible
11	160	0,027	0,052	Laakerin paikka	DIAM		10	5	5	250	Possible
12	590	-0,5	0,5		LENG		5	1	10	50	OK
13			0,8	Reiän paikka	OTHR		10	1	10	100	OK

Liitteessä 1 on potkuriakselin piirustus, jossa arvioidut elementit ovat numeroitu taulukon 4.2.1 mukaan. Tulosten pohjalta kohdan 7 lieriömäisyystoleranssi on ainoa, joka vaatii suurempia muutoksia. Koska kohdassa 7 valmistukselle annettu arvo on 10, olisi elementti joko suunniteltava uudelleen, jotta toleranssialuetta voidaan suurentaa, tai valmistusmenetelmää olisi muutettava. Kohdat 3-5 ja 9-11 saadaan hyväksyttäviksi joko parantamalla valmistusmenetelmää, kehittämällä mittausta ja tarkastusprosessia virheiden havaitsemiseksi. Halkaisijoiden mittausta on mahdollista kehittää tarkemmilla käsimittausvälineillä. Heiton ja lieriömäisyyden mittaaminen vaatii kuitenkin tarkoitukseen soveltuvaa mittauskonetta.

4.2.2 Ylärunko

Taulukossa 4.2.2 on potkurilaitteen ylärunгон FVRA-tulokset. Runkojen osalta tulokset ovat melko hyvin sovellettavissa saman mallisarjan erikokoisiin runkoihin, joissa peruskonstruktio pysyy muuttumattomana. Ylärunгон piirustukset ovat liitteessä 1. Piirustuksissa elementit on numeroitu.

Taulukko 4.2.2 Ylärungon FVRA-tulokset.

Feature Num	Eng Dim	Eng Lower Tol	Eng Upper Tol	Dimension Description	Feature Code	FVRA	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Status
1	490	0	0,063	Laakeripesä	DIAM		10	5	5	250	Possible
2	490	0	0,063	Laakeripesä	DIAM		10	5	5	250	Possible
3	590	0	0,07	Laakeripesä	DIAM		10	5	5	250	Possible
4			0,05	Dim 1 & 2 samankesk.	CONC		10	5	10	500	Possible
5	90	-60"	60"	Pesien kulma	ANGL		10	10	10	1000	NOT OK
6			0,05	Cruising	DIAM		10	10	10	1000	NOT OK
7	1606	-0,3	-0,1	Kääntökehänohjaus	DIAM		10	5	5	250	Possible
8			0,2	Dim 3 & 7 samankesk.	CONC		10	5	10	500	Possible
9			0,05	Kohtisuoruus	ANGL		10	5	10	500	Possible
10			0,5	Reiän paikka	POSN		10	1	10	100	OK
11			0,2	Yhdensuuntaisuus	PARR		5	5	10	250	OK
12	92,5	-0,2	0	Säde	RADI		5	5	1	25	OK
13	220	-0,2	0,2	Reiän paikka	POSN		5	1	5	25	OK
14	351,562	-0,05	0,05	Reiän paikka	POSN		5	1	5	25	OK
15	75	-0,05	0,05	Reiän paikka	POSN		5	5	10	250	OK
16	425	-0,05	0,05	Reiän paikka	POSN		5	5	5	125	OK
17	195	0	0,072	Halkaisija	DIAM		5	1	1	5	OK
18			0,1	Yhdensuuntaisuus	PARR		5	1	10	50	OK
19			0,1	Kohtisuoruus	ANGL		5	1	10	50	OK
20	230	0	0,072	Halkaisija	DIAM		10	1	1	10	OK
21			0,05	Kohtisuoruus	ANGL		10	5	5	250	Possible
22	31	-0,3	0,3	Paksuus	DIAM		5	1	1	5	OK
23			0,05	Kohtisuoruus	ANGL		10	5	10	500	Possible
24	80	0	0,046	Halkaisija	DIAM		5	1	1	5	OK
25	130	0	0,063	Halkaisija	DIAM					0	
26			0,1	Yhdensuuntaisuus	PARR					0	
27	130	0	0,063	Halkaisija	DIAM		5	1	1	5	OK
28	345	-0,2	0	Reiän paikka	POSN		10	1	5	50	OK

Kriittisin toleranssi ylärungossa on akseleiden risteily akselilinjojen risteyskohdassa ja linjojen välinen kulma. Sekä risteily- että akselilinjojen välinen kulma vaikuttavat suoraan kulmavaihteen hammaspyörien kosketuskuvioon. Hammaskosketuskuvion on oltava kohdallaan, jotta laite toimii kunnolla ja kestää käytössä. Muita kriittisiä kohteita ovat laakereiden paikat ja niihin liittyvät toleranssit, koska ne määrittävät akseleiden aseman rungossa. Ylärungossa myös laitteen käännönohjaus ja kääntömoottoreiden paikat (230 mm reikä) ovat tärkeitä laitteen toiminnan kannalta.

Kohdat 5 ja 6 vaativat muutosta rakenteeseen ja/tai valmistusmenetelmään, koska kohdat ovat sekä erittäin kriittisiä laitteen toiminnan kannalta ja vaikeita valmistaa tarkasti nykyisellä valmistusprosessilla. Taulukossa muut kohdat, joiden tila on mahdollinen (possible), saadaan hyväksyttäviksi parantamalla elementtien mittausta ja tarkastusta, jotta virheelliset elementit havaitaan tarkastuksessa. Laakerin paikkojen halkaisijoiden mittaukseen tarkoitettujen mittausvälineiden testauksesta on tuloksia otsikoiden ”6 Mittauskokeet” ja ”7 Tulokset ja niiden tarkastelu” alla. Myös geometriatoleranssien mittaukseen on arvioitu erilaisia vaihtoehtoja työn aikana. Kohtisuoruuden, samankeskeisyyden, yhdensuuntaisuuden ja paikan mittaukseen tarvitaan koordinaattimittausjärjestelmä, joka on riittävän tarkka vaadittujen toleranssien mittaamiseen.

4.2.3 Alarunko

Alarungon FVRA-tulokset ovat nähtävissä taulukosta 4.2.3. Kuten ylärunon osalta, voidaan myös alarungon tuloksia käyttää saman mallisarjan muiden laitekokojen arviointiin. Liitteestä 1 on alarungon piirustukset, josta selviää, mitä elementtiä taulukon numerot tarkoittavat.

Taulukko 4.2.3 Alarungon FVRA-tulokset.

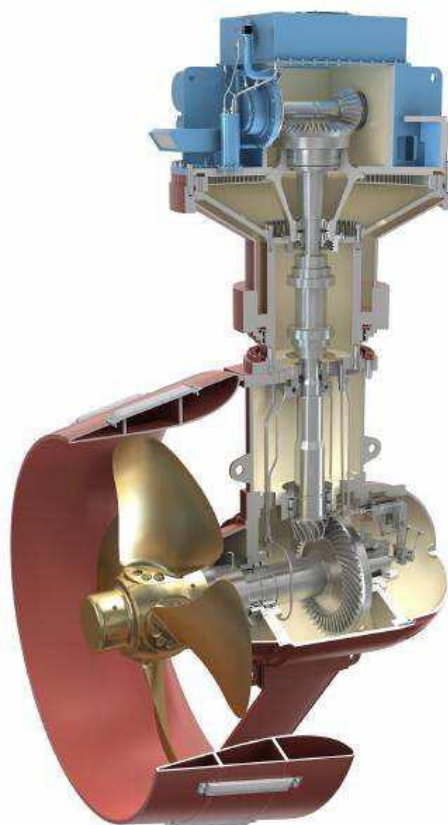
Feature Num	Eng Dim	Eng Lower Tol	Eng Upper Tol	Dimension Description	Feature Code	FVRA	Severity	Occurrence	Detection	RPN	Status
1			0,63	Crossing	DIAM		10	5	10	500	Possible
2	982	-0,3	0,3	Ulkohalkaisija	DIAM		1	5	5	25	OK
3	340	0	0,057	Laakeripesä	DIAM		10	5	5	250	Possible
4	355	-0,057	0	Ulkohalkaisija	DIAM		5	5	10	250	OK
5			0,05	Dim 3 & 4 samankesk.	CONC		10	10	10	1000	NOT OK
6			0,015	3 lieriömäisyys	CYLI		5	5	10	250	OK
7			0,1	Kohtisuoruus	ANGL		10	5	10	500	Possible
8	780	0	0,08	Laakeripesä	DIAM		5	5	1	25	OK
9			0,015	3 & 8 Heitto	RUNO		5	5	10	250	OK
10			0,1	Kohtisuoruus	ANGL		10	5	10	500	Possible
11	400	-0,3	0,3	Etäisyys	DIAM		1	1	10	10	OK
12	340	0,018	0,075	Laakeripesä	DIAM		5	10	10	500	NOT OK
13			0,015	12 Lieriömäisyys	CYLI		5	5	10	250	OK
14	340	0,1	0,2	?	DIAM		5	5	5	125	OK
15	342	0	0,089	Laakeripesä	DIAM		5	5	1	25	OK
16			0,015	12 & 15 Heitto	RUNO		5	5	10	250	OK
17			0,2	Kohtisuoruus	ANGL		5	5	10	250	OK
18	1600	-1	1	Etäisyys	DIAM		5	1	10	50	OK
19			0,2	Kohtisuoruus	ANGL		1	5	10	50	OK
20	272,5	-0,3	0,3	Etäisyys	DIAM		10	5	10	500	Possible
21	215	-0,5	0,5	Etäisyys	DIAM		10	1	10	100	OK
22	125	0	0,063	Halkaisija	DIAM		10	10	10	1000	NOT OK
23			0,1	Kohtisuoruus	ANGL		1	5	10	50	OK
24			0,2	Reiän paikka	POSN		5	5	10	250	OK

Alarungossa toiminnan kannalta kriittisiä ovat akseleiden risteily ja akselilinjat. Lisäksi kohdan 5 halkaisijoiden samankeskeisyys vaikuttaa potkuriakselin tiivisteseen, jonka on oltava kunnossa, jotta öljyn sekaan ei pääse merivettä. Myös kohdan 22 luukun tiiveys on siksi tärkeää. Elementit numero 5, 12 ja 22 ovat valmistuksen kannalta vaativia tiukkojen toleranssien takia. Muuten lähes kaikkien kohtien mittausta olisi hyvä kehittää, sillä varsinkin geometrioiden mittauksella lähes jokaisen elementin RPN arvo pienenesi ja mahdolliset (possible) elementit muuttuisivat hyväksyttäviksi.

5 OSAVALMISTUS JA NYKYISET MITTAUSMENETELMÄT

Tämän diplomityön lähtökohtana on ollut halu kehittää Rolls-Royce Oy Ab:n Rauman osavalmistuksen mittausmenetelmiä, jotta valmistettujen tuotteiden laatu voidaan paremmin tarkastaa ja havaita mahdolliset muutokset valmistusprosessissa. Sisäisessä arviossa ja tehdyssä RR-testissä havaittiin, että mittausvälineiden tarkkuutta olisi parannettava, jotta päästäisiin pienempään mittausepävarmuuteen. Kehittämällä myös geometriatoleranssien mittausta voitaisiin tarkkailla NC-työstökoneiden laaduntuottokykyä ja tuotteiden laatua.

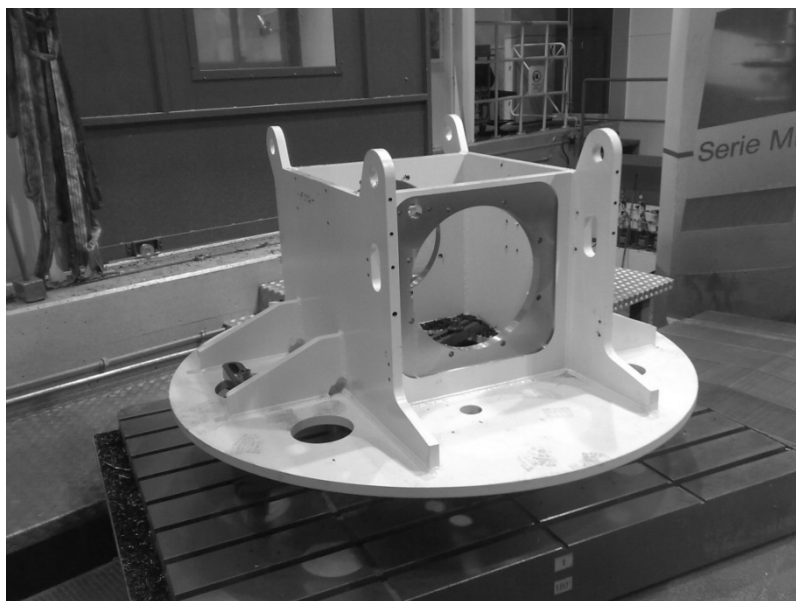
Tyypillinen Rolls-Royce Azimuth -potkurilaite koostuu ala-, ylä- ja välirungosta, kuva 5.1. Ala- ja ylärungossa on kulmavaihde ja välirungolla säädellään laitteen pituutta. Näistä ylä- sekä alarunkoa valmistetaan itse ja niiden lisäksi on omaa akselivalmistusta. Ylä- ja alarunko toimivat hammasvaihteen kotelona ja tämän takia niille on asetettu tiukat mitta- ja geometriatoleranssit. Rungoissa on mm. isoja sisäpuolisia toleroituja halkaisijoita aina 1300 mm asti. Akselit ovat isokokoisia ja painavia, halkaisijat n. 100 mm aina 1000 mm asti. Myös akseleille on asetettu tarkat mittatoleranssit sekä vaatimuksia mm. heiton ja lieriömäisyyden suhteen.



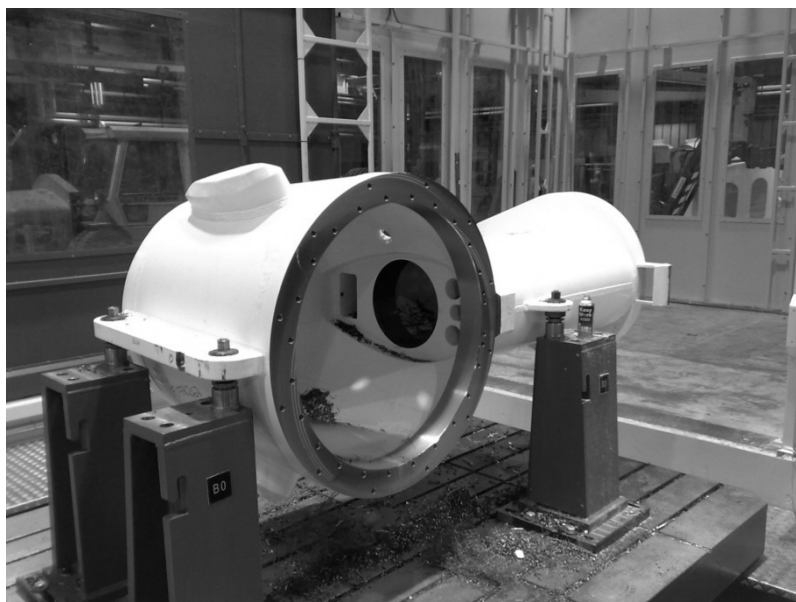
Kuva 5.1 Rolls-Royce Azimuth -potkurilaite.

Kuvan 5.1 mukaisessa Azimuth -potkurilaitteessa on 6 eri akselia. Akselin valmistus Rauman tehtaalla alkaa koneistuskeskuksesta, jossa oikaistaan aihion päät ja porataan akselin päähän tulevat reiät, mm. keskiöreikä, ja tehdään mahdolliset kierteet reikiin. Pitkät, akselin läpireiät porataan kanuunaporalla. Lopuksi akselit sorvataan valmiiksi.

Ylärunkon, kuva 5.2, valmistus alkaa hitsaamalla valmiiksi leikatut metallilevyt yhteen, jonka jälkeen aihiot hehkutetaan uunissa. Hehkutuksen, raepuhalluksen ja maalauksen jälkeen aihiot koneistetaan valmiiksi. Alarunkoja, kuva 5.3, on sekä pellistä hitsattuja että valettuja. Alarunko menee ensin koneistettavaksi, jonka jälkeen runkoon hitsataan suulake kiinni, jos sellainen tulee laitteeseen. Vaikka omassa valmistuksessa olevat potkurilaitteiden osat ovat hyvin samankaltaisia, on eri mallien ja laitekokojen välillä eroja. Yhteen alukseen toimitetaan yleensä kaksi potkurilaitetta, joten samanlaisia osiakin valmistetaan vain kaksi peräkkäin. Tuotanto on lähes yksittäisvalmistusta, mikä vaikuttaa myös tuotteiden mittaukseen, koska osien koko vaihtelee.



Kuva 5.2 Ylärunko.

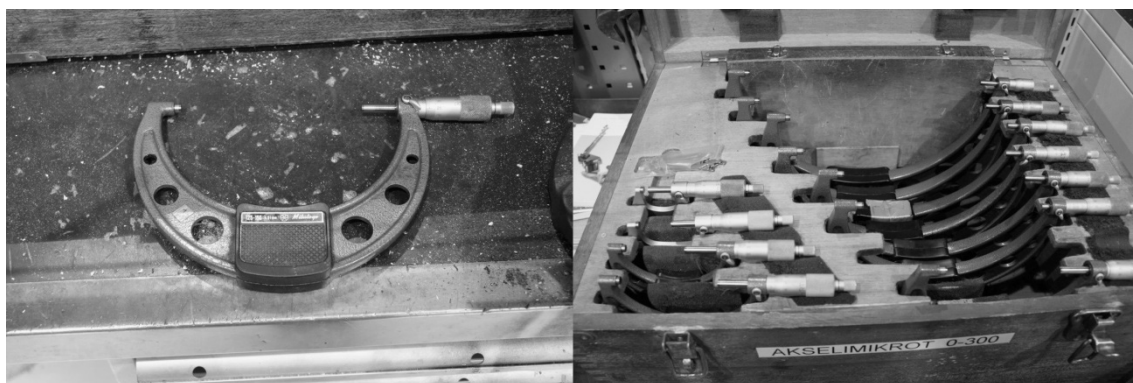


Kuva 5.3 Alarunko.

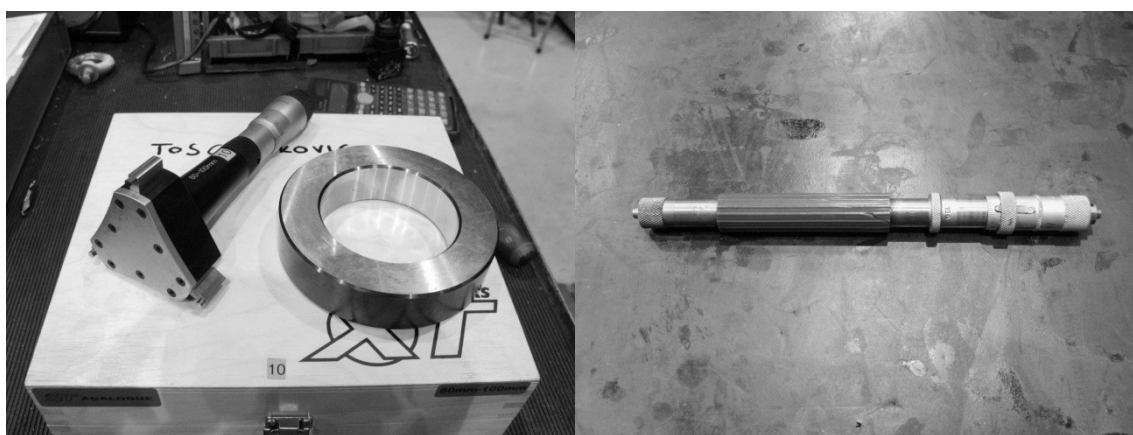
5.1 Mittausvälineet

Ennen tätä diplomityötä Rolls-Royce Oy Ab Rauman tehtaan osavalmistuksessa oli käytössä tavallisia, konepajoissa yleisesti käytössä olevia, käsimittausvälineitä. Kaikki mittausvälineet ovat laadukkaita, tunnettujen valmistajien tekemiä ja säännöllisesti kalibroituja. Kalibroinnin toteuttaa ulkopuolinen palveluntarjoaja, jolle mittauslaitteet lähetetään kalibrointijakson täyttyessä. Mikrometrien kalibrointiväli on 24 kk ja mittakellojen 12 kk. Kalibroinnin tarvetta mitassa seurataan erivärisillä tarroilla, joiden tulkitsemiseksi on julisteita ympäri tuotantotiloja.

Osavalmistuksessa on käytössä suuri määrä erilaisia mikrometrejä. Kaikki mikrometrit ovat perinteistä analogista mallia ja niissä on nonius-asteikko 0.01 mm jaolla. Kaikki käytettävät mittausvälineet ovat tunnettujen ja laadukkaiden valmistajien kuten Mituoyon tuotteita. Pääasiassa ulkopuoliset halkaisijat mitataan kaarimikrometreillä, kuvassa 5.4, ja sisäpuoliset halkaisijat tikkumikrometreillä tai pienimmät reiät kolmipistemikrometrillä, kuva 5.5. Näiden lisäksi on kierremikrometrejä, syvyysmikrometrejä ja muutama olakemittauslaite, kuva 5.6. Olakemittauslaitteessa on mittakello, jonka avulla olaketta verrataan asetettuun mittaan. Muuten mittakelloja käytetään vain asetuksessa, eikä valmiiden osien mittaukseen.



Kuva 5.4 Rolls-Royce Oy Ab:lla käytössä olevia kaarimikrometrejä.



Kuva 5.5 Vasemmalla Rolls-Royce Oy Ab:lla käytössä oleva kolmipistemikrometri ja oikealla tikkumikrometri.



Kuva 5.6 Olakemittauslaite.

Tuotannossa on myös muita mittausvälineitä, kuten rullamittoja ja työntömittoja. Näitä ei kuitenkaan käytetä valmiiden tuotteiden tarkastamiseen, vaan lähinnä apuna tuotannossa esimerkiksi kappaleen kiinnityksessä työstökoneeseen.

5.2 Mitattavat elementit

5.2.1 Akselivalmistus

Akseleiden valmistuksessa käytetään kaarimikrometrejä toleroitujen ulkopuolisten halkaisijoiden mittaamiseen, kuva 5.4. Tällaisia ovat mm. laakereiden tai hammaspyörän paikat. Akseleiden päihin voidaan tehdä myös reikä, jolle on asetettu mittatoleranssi. Reiät, joiden halkaisija on alle 120 mm, mitataan kolmipistemikrometrillä ja tätä isommat mitataan tikkumikrometrillä. Näissä molemmissa on perinteinen nonius-asteikko. Akseleissa voi olla myös kierre tai olake akselin päässä. Kierre tarkastetaan kierremikrometrillä, mutta tulosta ei kirjata mihinkään. Olakkeiden mittaamiseen käytetään olakemittauslaitetta, kuvassa 5.6, joka asetetaan tikkumikrometrillä. Asetustapa ei ole tarkin mahdollinen ja tikkumikrometrin mittausrvirhe siirtyy myös mittaustulokseen.

Akselin sorvausta ei tehdä valmiilla NC-ohjelmalla ns. yhdellä napin painalluksella aihioista valmiiksi, vaan rouhinnan jälkeen otetaan mittalastu ja kappale mitataan. Tämän mittaustuloksen perusteella määritellään viimeistelyssä poistettava ainevahvuus. Lopuksi viimeistellyn akselin toleroidut halkaisijat mitataan ja niistä tehdään mittauspöytäkirja. Geometritoleranssien mittausta ei yleensä tuotannossa tehdä, vaan luotetaan tarkastettujen sorvien laaduntuottokykyyn. Lähes kaikki akselit myös sorvataan kärkien välissä yhdellä kiinnityksellä, joten akselin heiton pitäisi olla minimissä. Jos akseli kuitenkin joudutaan kääntämään, tarkistetaan kiinnityksen heitto mittakellolla.

5.2.2 Runkojen valmistus

Valmistettavista ala- sekä ylärungoista mitataan toleroitujen reikien halkaisijat. Pienimmät halkaisijat mitataan kolmipistemikrometrillä, mutta valtaosa rei'istä on niin suuria, että ne mitataan tikkumikrometrillä. Sekä ylä- että alarunkojen kaikki reiät viimeistellään avartamalla, jotta rei'istä tulisi mahdollisimman pyöreitä. Ennen viimeistelyä rei'istä otetaan mittalastu ja mittaustuloksen mukaan säädetään avarrusterää. Kun kappale on valmis, halkaisijat tarkastetaan ja mittaustulos merkitään reikään, josta se on kokoonpanossa luettavissa. Lisäksi mittaustulokset kirjataan mittauspöytäkirjaan.

Kappaleen geometrian mittaamiseen tuotannossa ei ole mittauslaitteita. Koska tuotannossa joudutaan luottamaan NC-työstökoneen tarkkuuteen, tarkastetaan kaikkien omien koneistuskeskusten liikegeometriat muutaman kerran vuodessa.

6 MITTAUSKOKEET

Osana diplomityötä tehtiin Rauman tehtaalla mittauskokeita käsimittausvälineillä. RR-testien avulla selvitettiin nykyisten mittausvälineiden ja mittaajien mittauskyky ja testattiin mahdollisia uusia mittausvälineitä. Kokeita tehtiin akselin ulkopuolisten halkaisijoiden ja runkojen sisäpuolisten halkaisijoiden mittaamiseen soveltuvilla mittausvälineillä. Käsimittausvälineiden RR-testien lisäksi kaksi akselia, kaksi alarunkoa ja yksi ylärunko mittaautettiin koordinaattimittauskoneella ulkopuolisella palveluntarjoajalla. Koordinaattimittauksen tulokset kertoivat valmistusprosessin laaduntuottokyvystä ja prosessin sen hetkisestä tilasta. Mittauksia käytiin seuraamassa paikan päällä, mikä tarjosi mahdollisuuden keskustella mittaajien kanssa mahdollisista mittauksen ongelmapaikoista/-kohdista.

Rolls-Royce Oy Ab:lla on Raumalla Leican laserseurain -mittausjärjestelmä. Laite on hankittu huollon tarpeisiin, jotta huolto voisi arvioida vaurioituneiden, esimerkiksi kivelle ajetun, potkurilaitteiden kuntoa ja korjattavuutta missä päin maailmaa tahansa. Huolto ei käytä laitteistoa jatkuvasti, joten koulutuksen yhteydessä arvioitiin laitteiston soveltuvuutta myös tuotannon tarpeisiin. Toinen liikuteltava koordinaattimittausjärjestelmä, johon tutustuttiin, oli Faron nivelvarsikoordinaattimittauskone. Esittelyssä arvioitiin Faron kyvykkyyttä mitata ala- ja ylärunkoja.

6.1 Käsimittausvälineet

Tutkittavia käsimittausvälineitä akseleiden halkaisijoiden mittaukseen olivat kaarimikrometri, sekä analogisella nonius-asteikolla (0,01 mm resoluutio) että digitaalisella näytöllä (0,001 mm resoluutio), ja asetettava hakatulkki digitaalisella mittakellolla (0,001 mm resoluutio). Kaikilla kolmella mittausvälineellä tehtiin pitkä RR-testi. Kolme sorvaajaa mittasi testiakselista viisi eri halkaisijaa kolme kertaa kullakin mittausvälineellä. Testiakseli, kuvassa 6.1, on Rauman tehtaalla mittauksia varten sorvattu 2 m pitkä akseli, jossa on halkaisijat 5 mm välein 75 – 310 mm. Testiakseli oli toinen koordinaattimittauskoneella mitatuista akseleista, joten akselistä on myös koordinaattimittauksen tulokset. RR-testeihin ei ollut mahdollista käyttää potkurilaitteiden oikeita akseleita, koska akseleita tehdään yleensä vain kaksi kerrallaan ja testiin tarvitaan useampi kappale mitattavaksi. Tässä tapauksessa ”kappaleet” olivat akselin eri halkaisijat välillä 200 – 220 mm. Tulosten analysointi onnistuu kuitenkin Teknisen tiedotuksen julkaisun – Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit (lähde 7) –

mallin mukaan, koska siinä vertaillaan vain saman kappaleen mittausten eroa ja kaikkien mittausten keskiarvoja.



Kuva 6.1 Testiakseli, johon on sorvattu halkaisijat 75 - 310 mm mittauskokeita varten.

Sorvaajien tekemän pitkän RR-testin lisäksi tehtiin lyhyt RR-testi ja Type 1 -mittaustesti kaarimikrometreillä ja hakatulkillä. Type 1 -testissä mitattiin testiakselin 210 mm halkaisija 25 kertaa, kaikilla kolmella mittausvälineellä. Testi kertoo mittauksen systemaattisesta virheestä ja toistettavuudesta. Testi soveltuu hyvin uuden mittauslaitteen nopeaan testaukseen ennen käyttöönottoa, mutta ei ole yhtä kattava kuin pitkä RR-testi. Type 1 -testin tulokset analysoin Minitab-ohjelmalla, joka on tilastollista analyysia varten kehitetty tietokoneohjelma. Ohjelmaa käytetään mm. Six Sigma -analyysien tekemiseen ja on laajasti käytössä Rolls-Royce Oy Ab:lla. Minitabissa on useita erilaisia valmiita malleja mittaussjärjestelmien analysointiin. [25]

Runkojen reikien mittaukseen oli tutkittavana nykyinen nonius-asteikolla oleva tikkumikrometri (0,01 mm resoluutio) ja digitaalinen tikkumikrometri (0,001 mm resoluutio). Koneistajat tekivät pitkän RR-testin sekä analogisella että digitaalisella mikrometrillä. Tämän testin tulosten analysointi oli mahdollista Minitab-ohjelmalla, koska kaikkien testissä mitattujen reikien nimellishalkaisija oli sama 490 mm. Suurien, yli 200 mm reikien, mittaukseen ei saatu kokeiltavaksi muita mittausvälineitä kuin tikkumikrometrejä. Kolmipistemikrometrejä on saatavilla myös isoja reikiä varten, mutta niitä on tarjolla vain tehdastilauksena ja ne ovat melko kalliita. Lisäksi koneistajia epäilytti isojen kolmipistemikrometrien käytännöllisyys mitattaessa suuria reikiä, jotka ovat pystyssä. Kolmipistemikrometrillä voi mitata reiän kolmiomaisuuden, mutta ei reiän soikeutta, toisin kuin kaksipistemittauslaitteet, esimerkiksi tikkumikrometri.

Myös reikien mittaukseen on olemassa erilaisia vertailumittaukseen perustuvia välineitä. Nämä mitat täytyy asettaa jokaiselle mitattavalle mitalle erikseen, kuten asetettava hakatulkki. Asettaminen vaatii asetusrenkaan jokaiselle mitattavalle nimellishalkaisijalle tai jonkin muun asetusmenetelmän, kuten pituuden mittauskoneen. Koska mittauslaitteiden asettaminen ei olisi ollut mahdollista, ei tällaisia mittauslaitteita tämän diplomityön aikana testattu.

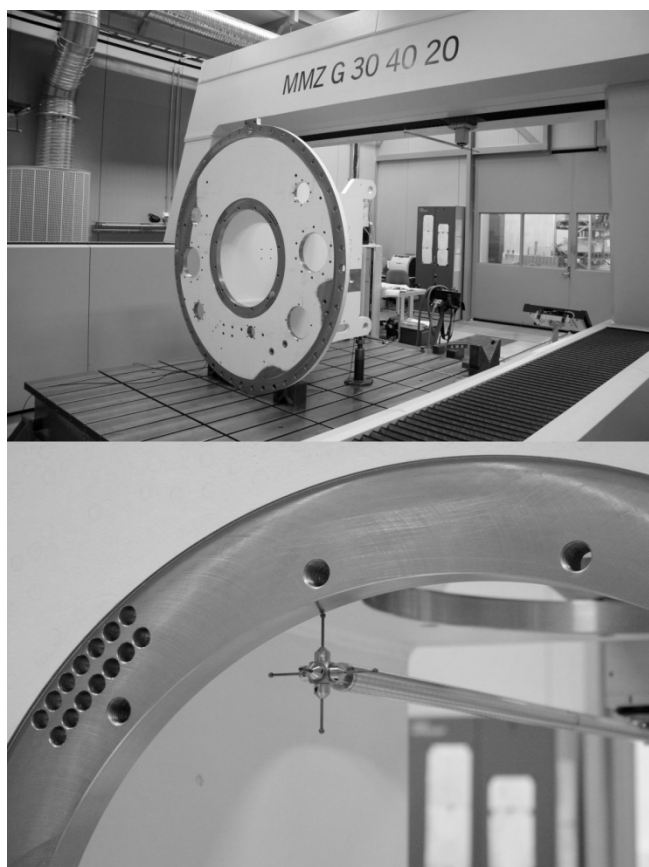
6.2 Koordinaattimittaus

Diplomityön aikana mitattiin koordinaattimittauskoneella kaksi akselia, kaksi alarunkoa ja yksi ylärunko. Mittauksen teki Moventas Santasalo Karkkilassa, jossa heillä on Zeiss MMZ G 30/40/20 koordinaattimittauskone ja Calypso-ohjelmisto. Koneen mittausalue on 3000x4000x2000 mm, joka on riittävä Rolls-Royce Oy Ab:n Rauman tehtaalla valmistettavien ylä- sekä alarunkojen mittaukseen. Alarunko täytyy mitata kuitenkin ilman potkurin ympärille tulevaa suulaketta, joka hitsataan runkoon koneistuksen jälkeen. Zeiss lupaa koordinaattimittauskoneen maksimivirheeksi $(MPE) = (3,5 + L / 400 < 12) \mu m$.

Kaikki mittaukset tehtiin koskettavilla mittauskärjillä. **Akseleiden** halkaisijat mitattiin skannaamalla akselin ympäri lähes koko kierros (yli 300 astetta). Esimerkiksi 210 mm halkaisijan mittaukseen on otettu lähes 7000 pistettä. Tuloksina saatiin akselin halkaisija, ympyrämäisyys, heitto ja kartiokulma mitatuissa kohdissa akselia. Skannaamalla saadaan mitattua paljon enemmän pisteitä nopeasti kuin mittaamalla vain yksittäisiä pisteitä. Kun akselistä on mitattu pisteitä lähes koko kierros, koordinaattimittauskoneen ohjelmisto pystyy myös piirtämään kuvaajan poikkileikkauksen ympyrämäisyydestä. Kuvaaja havainnollistaa hyvin poikkeamia akselin ympyrämäisyydessä. Halkaisijan ja ympyrämäisyyden sovituksessa ohjelmisto käytti pienimmän neliösumman periaatetta.

Yhdestä testiakselin halkaisijasta (210 mm) laskettiin myös suurin ja pienin halkaisija, käyttäen suurimman sisään piirrettävän (MI) ja pienimmän ulos piirrettävän ympyrän (MC) sovitusta. Tätä suurimman sisään piirrettävän ympyrän halkaisijaa hyödynnettiin käsimitausvälineiden Type 1 -testissä.

Runkojen mittaus ylärunгон osalta onnistui ilman kappaleen siirtoa, mutta alarunгон asentoa jouduttiin muuttamaan, jotta kaikki elementit saatiin mitattua. Tämä onnistui, koska siirtoa ennen ja siirron jälkeen mitatuilla elementeillä ei ole keskinäisiä riippuvuuksia. Lisäksi kaikki yhteen peruselementtiin liitetyt toleranssit pyrittiin mittaamaan yhdellä mittauskärjellä poikkeaman minimoimiseksi. Kuvassa on 6.2 potkurilaitteen ylärunko koordinaattimittauksessa.



Kuva 6.2 Potkurilaitteen ylärunko koordinaattimittauksessa Karkkilassa.

Rungoissa on useita toleroituja halkaisijoita ja reikiin liitettyjä geometriatoleransseja. Peruselementeiksi on määritelty reiät, joihin akseleiden laakeripesät tulevat. Rei'ille on asetettu lieriömäisyystoleransseja sekä akselin laakerin paikoilla on kokonaisheittotoleranssi. Reiän, jossa laakeripesä sijaitsee, ja laipan, johon laakeripesä kiinnitetään, välillä on kohtisuoruustoleranssi. Laitteen toiminnan kannalta yksi tärkeimmistä toleransseista on kulmavaihteen akselilinjojen risteily, joka määrittää hammaspyörien paikan toisiinsa nähden. Lisäksi on joukko muita geometriatoleransseja mm. samankeskeisyydelle ja muiden reikien paikoille. Toleranssivaatimukset ovat hyvin tiukkoja ottaen huomioon laitteen suuren koon ja akselilinjojen pituuden.

7 TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

7.1 Ulkopuoliset halkaisijat

Akseleiden laakerin paikoilta vaadittu mittatoleranssi on IT6, joka on 180 – 250 mm halkaisijalle 29 μm . [15] Ensin ovat tulokset lyhyestä RR-testistä, jotka tehtiin kaikilla kolme mittaustalaitteella uusien mittaustalaitteiden saavuttua. Testin tuloksena saatiin mittauksen toistettavuus prosentteina toleranssialueesta taulukossa 7.1.1. Liitteessä 2 on esitetty mittauspöytäkirjat ja laskelmat.

Taulukko 7.1.1 Lyhyt RR-testi ulkopuolisen halkaisijan mittaussvälineillä.

Lyhyt RR-testi

Koekappale:

Testiakseli

KPL toleranssi:

0,029 mm

	Kaarimikrometri (0,01)	Kaarimikrometri (0,001)	Hakatulkki (0,001)
Toistettavuus	86 %	31 %	34 %

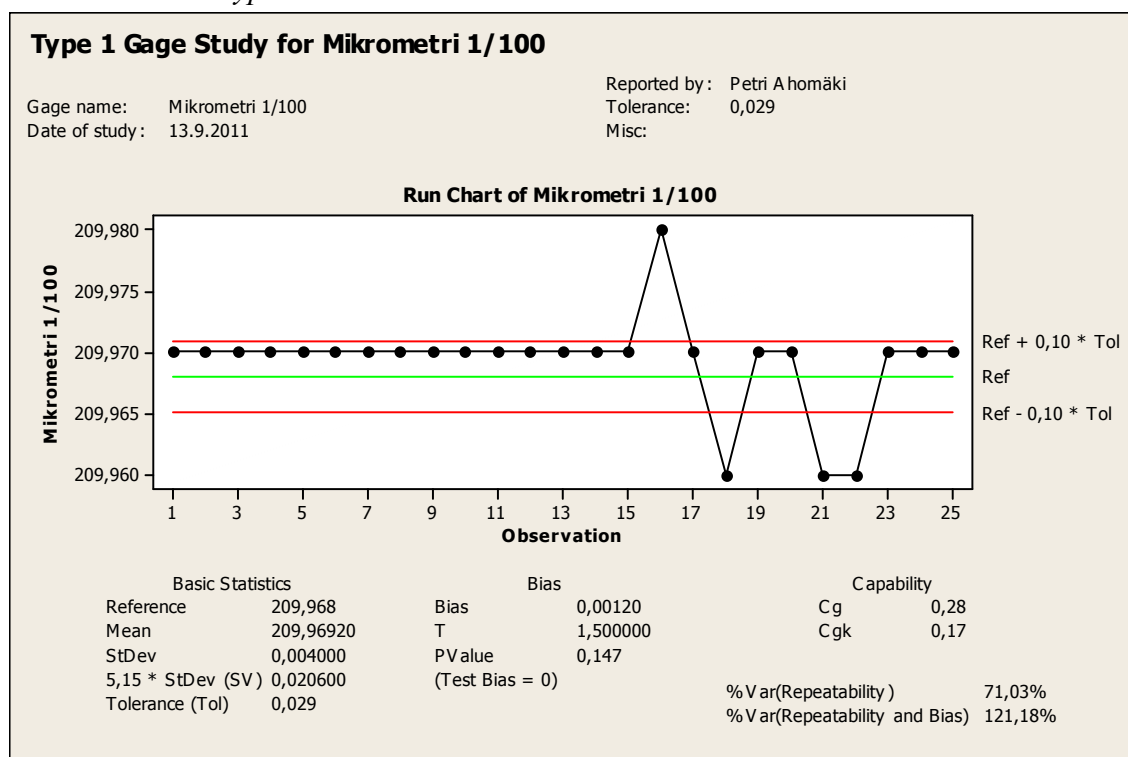
Lyhyen testin perusteella voidaan päätellä, että kaarimikrometri 0,001 mm:n digitaalisella näytöllä ja hakatulkki omaavat pienemmän mittauserävarmuuden kuin perinteinen kaarimikrometri 0,01 mm resoluutiolla. Perinteinen kaarimikrometri on riittämätön kyseisen toleranssin tarkastukseen, koska sen resoluutio ei täytä Rolls-Roycen mittaussöjeen vaatimusta, että resoluutio on oltava toleranssialue jaettuna kymmenellä. Tässä tapauksessa vaadittava resoluutio olisi 2,9 μm , eli selvästi pienempi kuin perinteisen kaarimikrometrin 10 μm resoluutio.

Uuden digitaalisen kaarimikrometrin tai hakatulkin tulokset eivät ole aivan hyväksyttävällä tasolla. 30 % epävarmuutta on suurin hyväksyttävä mittauserävarmuus kyseisen toleranssin mittaamiseen. Hakatulkin kohdalla suurin satunnaisvirheen lähde on mittaustalaitteen asetus mittapalojen avulla. Mittapalat ovat kohtuullisen kevyitä ja kun niistä tehdään yli 200 mm pitkiä yhdistelmiä, palat saattavat herkästi jäädä hieman vinoon hakatulkin mittausspäiden väliin. Hakatulkin asetus tehtiin samassa tilassa mittausten kanssa, jotta olosuhteet pysyivät mahdollisimman muuttumattomina. Suurin ero mitattaessa samaa kappaletta hakatulkillä syntyy joko mittaustalaitteen asetuksessa mittausten välillä tai kappaletta ei mitata aivan samasta kohdasta, jolloin kappaleen muotovirhe vaikuttaa mittaustulokseen. Mittaus hakatulkillä on hyvin nopeaa ja helppoa. Samalla asetuksella tehtyjen peräkkäisten mittausten keskihajonta on alle 1 μm .

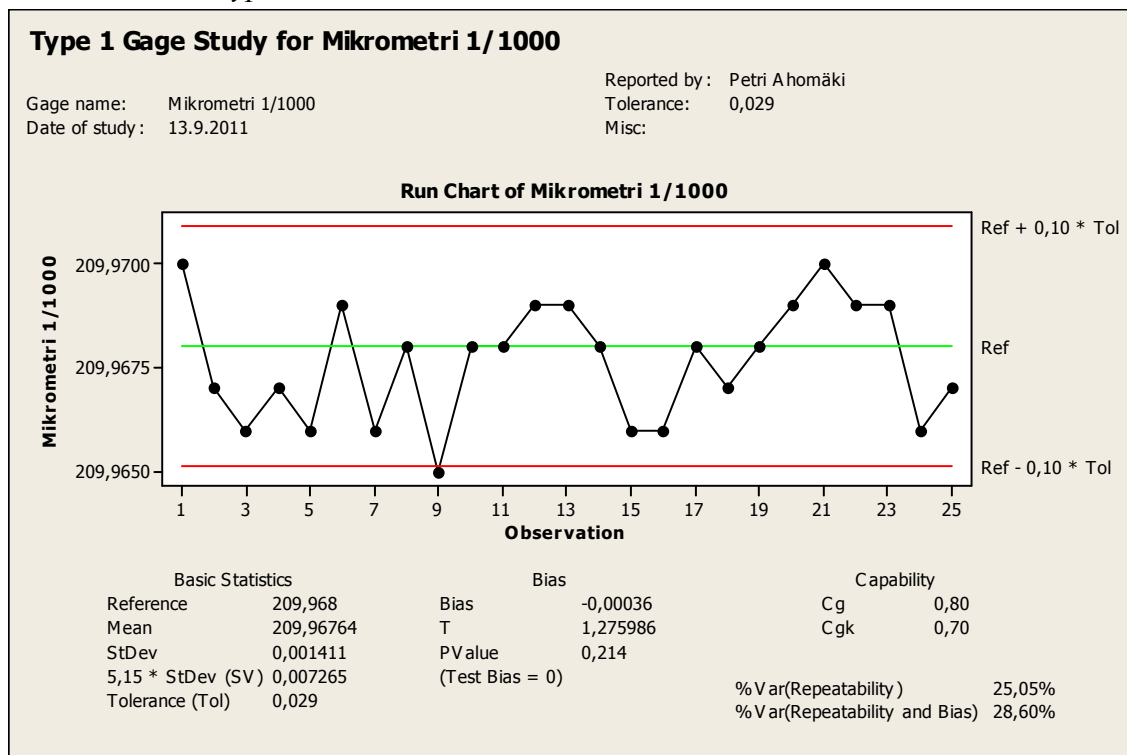
Type 1 -testissä mitattiin kaikilla kolmella mittausvälineellä tunnettu halkaisija 25 kertaa. Testi kertoo mittauksen toistettavuudesta ja mahdollisen systemaattisen virheen suuruuden. Arvioitaessa systemaattista virhettä tässä tapauksessa ongelmaksi tulee, ettei testiakseli ole täysin pyöreä. Testiä varten etsittiin akselista kohta, jossa sen halkaisija on pienimmillään ja mitattiin akseli tästä kohdasta. Referenssimittana on käytetty koordinaattimittauksesta saatuja tuloksia akselin halkaisijalle (210 mm halkaisija) ja niistä laskettuja suurimman sisään piirretyn ympyrän halkaisijaa. MI tulos on 209,968 mm. Tämä pistejoukkoon sovitetun ympyrän halkaisija on kuitenkin eri asia kuin käsimittausvälinein mitattu kahden pisteen välinen etäisyys. Tulokset koordinaattimittauksesta halkaisijan 210 mm ympyrämäisyydelle ovat liitteessä 3.

Taulukoissa 7.1.2, 7.1.3 ja 7.1.4 Type 1 on mittauslaitetestin tulokset Minitabilla laskettuna. Kuvaajasta nähdään, miten mittautulokset sijoittuvat referenssiarvoon nähden $\pm 10\%$ toleranssialueesta. Tunnettuun referenssiarvoon täytyy suhtautua varauksella mittautavan takia. Myös mikrometrin ja hakatulkkin erona on mittauskärkien halkaisija. Halkaisija on mikrometrillä 6 mm ja hakatulkillä 22 mm. Mittauskärkien halkaisija voi vaikuttaa tulokseen, koska kyseessä ei ole mikään tarkkuusvalmistettu kappale ja tulokset ovat 1 μm :n resoluutiolla.

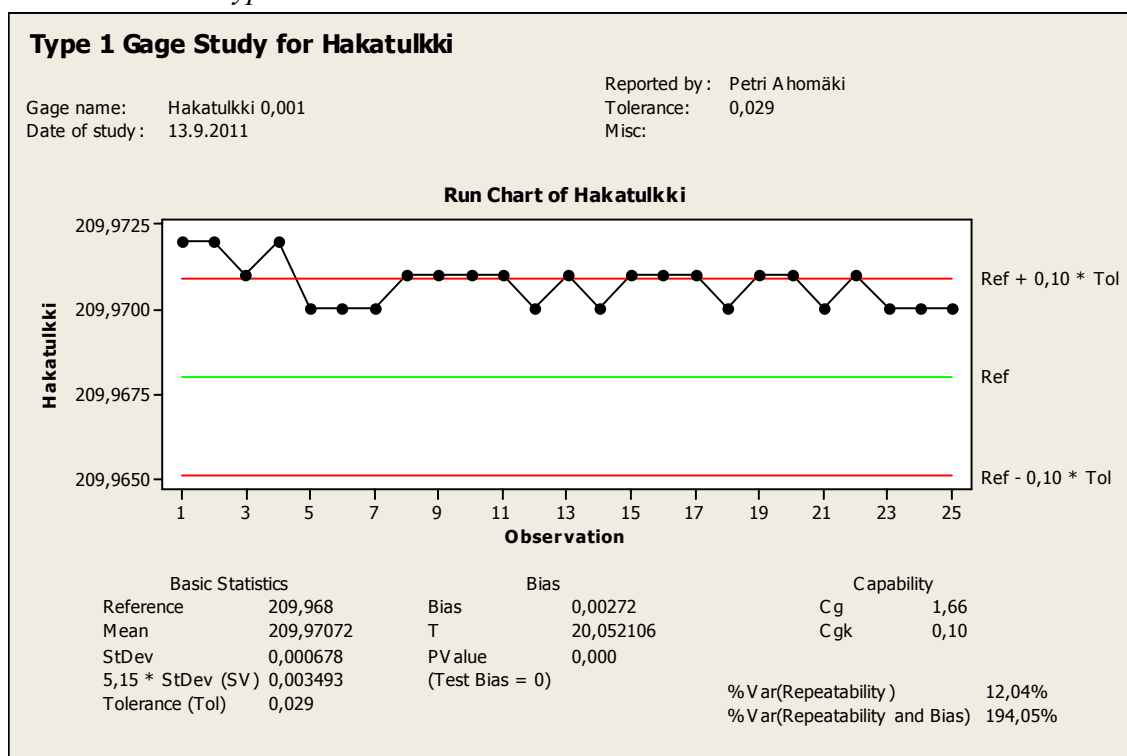
Taulukko 7.1.2 Type 1 -testin tulokset vanhalle mikrometrille.



Taulukko 7.1.3 Type 1 -testin tulokset uudelle mikrometrille.



Taulukko 7.1.4 Type 1 -testin tulokset asetettavalle hakatulkkille.



Testin tulokset ovat toistettavuuden osalta samansuuntaisia kuin lyhyen RR-testinkin, paitsi hakatulkin tarkkuus on parantunut 12 %:iin 34 %:sta. Tämän arvioitiin johtuvan juuri hakatulkin asetuksesta, johon saa paremman tuntuman, kun sitä tekee useita

kertoja peräkkäin. Tuloksista näkee, miten vanhan mikrometrin resoluutio-ongelma vaikuttaa tuloksiin, kun pienin mitan muutos on aina 0,01 mm.

Bias, joka kuvaa systemaattista virhettä mittauksessa, ei tässä tapauksessa ole luotettavin mahdollinen, mitattavan kappaleen muotovirheen ja referenssiarvon määrittävien vuoksi. Liitteen 3 raportista nähdään, että akselin ympyrämaisyydeksi on koordinaattimittauskoneella mitattu 14 μm . Kaikilla kolmella käsimitausvälineellä, halkaisija mitataan kahden pisteen välisenä etäisyytenä. Mittauskoneen tulos on puolestaan suureen pistejoukkoon pienimmän neliösumman menetelmällä materiaalin sisään sovitetun ympyrän halkaisija. Vaikka hakatulkin variaatioprosentti toistettavuudelle ja systemaattiselle virheelle kasvaa lähelle 200 %, mittauksen keskiarvo on alle 3 μm päässä referenssiarvosta.

Kolmantena testinä sekä uudella että vanhalla mikrometrillä ja hakatulkillä tehtiin pitkä RR-testi. Testin tulos on mittauksen toistettavuudella ja uusittavuudella saadun yhdistetyn satunnaisvirheen osuus toleranssialueesta prosentteina. Saadut tulokset on esitetty taulukossa 7.1.5.

Taulukko 7.1.5 Pitkä RR-testi ulkopuolisen halkaisijan mittausvälineillä.

Pitkä RR-testi

Koekappale:	Testiakseli		
KPL toleranssi:	0,029 mm		
	Kaarimikrometri (0,01)	Kaarimikrometri (0,001)	Hakatulkki (0,001)
Toistettavuus	0 %	40 %	17 %
Uusittavuus	19 %	27 %	18 %
Kokonais RR	19 %	48 %	25 %

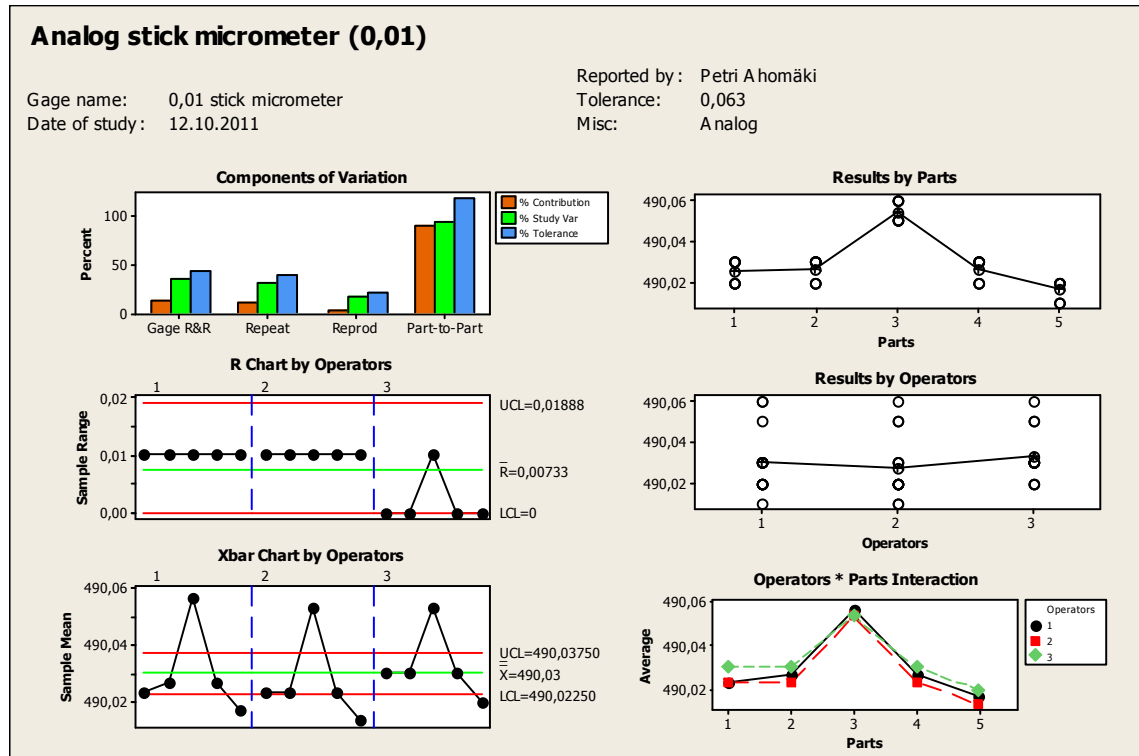
Pitkän RR-testin tulokset ovat hakatulkin osalta kahden aiemmin tehdyn suuntaisia ja kokonais RR % pysyy alle 30 %. Uuden digitaalisen kaarimikrometrin osalta toistettavuus kasvaa yli 30 % ja kokonais RR 48 %:iin. Tämä tarkoittaa, ettei menetelmä tällaisenaan ole kyvykäs mittaamaan vaadittuja toleransseja. Vanhan kaarimikrometrin tuloksessa näkyy laitteen resoluutio-ongelma. Kaikki kolme sorvaajaa saivat jokaiselle kappaleelle saman tuloksen kaikilla kolmella mittauskerralla. Tämän takia tulos toistettavuudelle on 0 %. Todellisuudessa vanha kaarimikrometri ei voi olla uutta yhtään tarkempi ellei toinen laite ole jotenkin viallinen. Tuloksesta voidaan kuitenkin päätellä, että mikrometri on työntekijöille tuttu mittausväline, jonka käytön ainakin nämä kolme henkilöä hallitsevat.

7.2 Sisäpuoliset halkaisijat

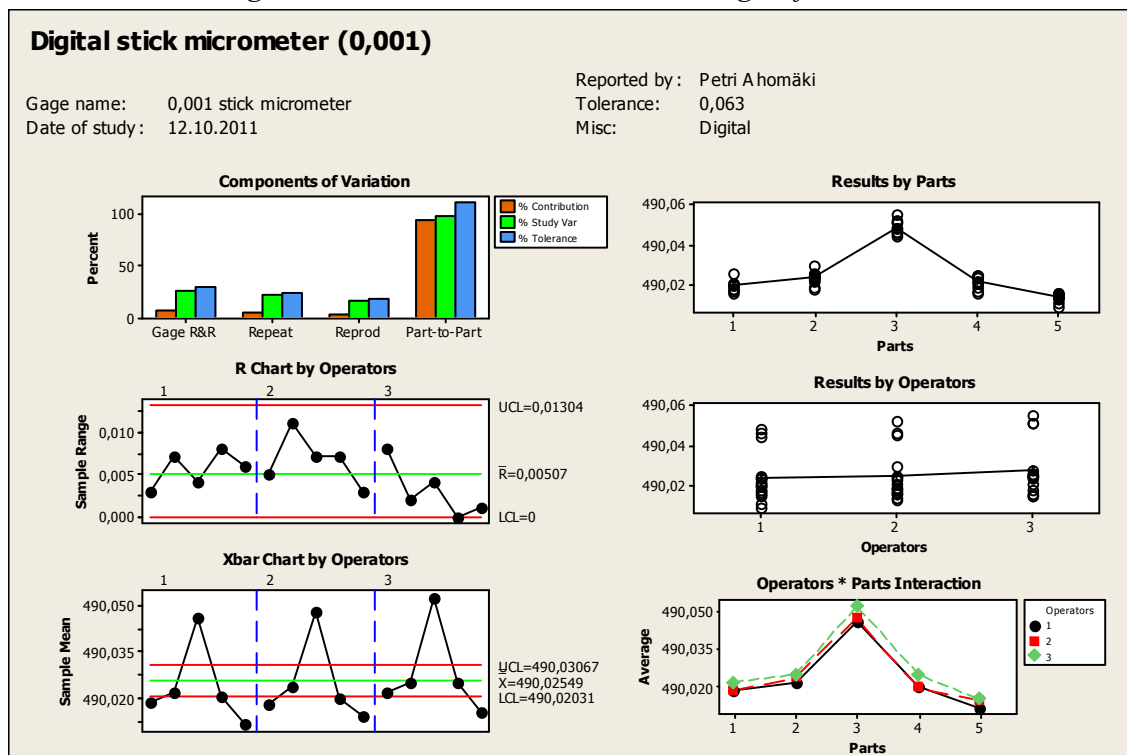
Ylä- ja alarungon laakerin paikoilta vaadittu mittatoleranssi on IT7, joka on 400 – 500 mm halkaisijalle 63 μm . [15] Pitkä RR-testi toteutettiin niin, että kolme koneistajaa

mittasi viidestä eri ylärungosta nimellismitaltaan 490 mm reiän sekä vanhalla analogisella että uudella digitaalisella mikrometrillä. Taulukoissa 7.2.1 ja 7.2.2 on esitetty RR-testin tulokset graafisina taulukoina ja taulukossa 7.2.3 vielä tarkemmin numeerisina arvoina. Taulukon 7.2.3 arvoista ”%Tolerance” vastaa ulkopuolisen halkaisijan mittausvälineille tehdyn RR-testin kokonais RR-arvoa.

Taulukko 7.2.1 Analogisen tikkumikrometrin RR-testin graafiset tulokset.



Taulukko 7.2.2 Digitaalisen tikkumikrometrin RR-testin graafiset tulokset.



Taulukko 7.2.3 Tikkumikrometriä pitkän RR-testin numeeriset tulokset.

	%Study Var	%Tolerance	%Contribution	Distinct Categories
Analog (0,01)	35 %	43 %	12 %	3
Digital (0,001)	25 %	28 %	6 %	5

Taulukoissa 7.2.1 ja 7.2.2 vasemmalla ylhäällä olevassa kuvassa on esitetty variaatio prosentteina kokonais-RR-arvosta, toistettavuudelle, uusittavuudelle ja kappaleiden väliseen eroon. Kappaleiden välisen variaation on hyvä olla mahdollisimman suuri ja muiden variaatio komponenttien mahdollisimman pieniä. Tällöin testin variaatiosta mahdollisimman suuri osa syntyy kappaleiden välisestä erosta, eikä mittausjärjestelmästä.

Taulukossa 7.2.3 on esitetty ensimmäisen kuvan pylväiden arvot numeerisessa muodossa. Jotta mittausjärjestelmä on kyvykäs mittaamaan kappaleet riittävällä tarkkuudella, tulisi ”%Study Var” ja ”%Tolerance” olla alle 30 %, aivan kuten muissakin RR-testeissä. ”%Contribution” kertoo, mikä on mittausjärjestelmän eli kokonais-RR-arvon osuus testin kokonaisvariaatiosta. Hyväksyttävä arvo on alle 9 %. Viimeisenä ”Distinct Categories” kuvaa mittauslaitteen resoluutiota. Suurempi arvo on tässä parempi ja viittä pidetään pienimpänä hyväksyttävänä. [25]

Tulokset osoittavat, että digitaalisella mikrometrillä voidaan mitata runkojen reiät tyydyttävällä tarkkuudella. Vanha analoginen mikrometri kärsii myös sisäpuolisten halkaisijoiden kanssa resoluutio-ongelmasta vaaditulla toleranssialueella.

Minitab-ohjelmalla saadaan testin tuloksista RR-arvon lisäksi myös muuta tilastollista tietoa. R-kortista nähdään jokaisen mittaajan tietyn kappaleen mittaustulosten vaihteluväli. Mahdollisimman pieni vaihteluväli on tavoiteltava. Kortin avulla nähdään mm. onko jonkin kappaleen mittauksessa ollut erityisiä ongelmia. Alin kuvaaja vasemmalla esittää mittaajan yhden kappaleen mittausten keskiarvoa. Tässä kuvassa on toivottavaa, että useita kappaleita on rajojen ulkopuolella. Se osoittaa, että mittaajajärjestelmä on kyvykäs erottamaan eri kappaleet. [25]

Ylin kuva oikealla esittää yhden kappaleen kaikkien mittaustulosten vaihteluväliä. Keskimmäisestä kuvasta oikealla nähdään mittaustulosten keskiarvot mittaajaa kohden. Hyvässä tuloksessa viiva eri mittaajien välillä on vaakasuorassa. Viimeinen kuva vertaa mittaajien mittaustuloksia eri kappaleille. Eri mittaajien viivojen tulisi olla mahdollisimman lähellä. [25]

Näistä tuloksista ei mittaajien kesken löydy suuria eroja, mikä osoittaa heidän hallitsevan kyseiset mittauslaitteet hyvin. Mahdollisesta systemaattisesta virheestä tämä testi ei kuitenkaan kerro mitään. Sisäpuolisten halkaisijoiden mittaukseen tarkoitetuilla mittaussäilyneillä ei ollut mahdollista tehdä Type 1 -testiä, koska referenssikappaletta, jonka halkaisija tunnettaisiin, ei ollut käytettävissä.

7.3 Koordinaattimittaukset

Koordinaattimittausten tarkoituksena oli mitata akseleista ja rungoista kaikki mahdolliset mitta- ja geometriatoleranssit. Mittaukset suunnitteli ja toteutti ulkopuolinen mittauspalvelun tarjoaja. Koordinaattimittauksen tuloksia arvioitaessa ei ole huomioitu mittausepävarmuutta, koska sen epävarmuuden määrittelyyn ei ollut mahdollisuutta. Valmistajan ilmoittama pituudenmittauksen maksimivirhe koordinaattimittauskoneelle on $(MPE) = (3,5 + L / 400 < 12) \mu\text{m}$, missä $L = \text{mm}$.

7.3.1 Akselit

Testiakselissa, kuva 6.1, on 48 eri halkaisijaa välillä 75 – 310 mm:ä. Akseli mitattiin koneistuksen jälkeen analogisilla kaarimikrometreillä ja sitten koordinaattimittauskoneella. Mittausten tulokset halkaisijoiden osalta ovat taulukossa 7.3.1. Taulukossa on mitan nimellishalkaisija, kaarimikrometrillä mitatut tulokset, koordinaattimittauksen tulokset ja vielä näiden erotus.

Taulukko 7.3.1 Testiakselin mittaustulokset.

Nimellishalkaisija	Mikrometri	Koordinaattimittauskone	Erotus
75	74,98	74,970	0,010
80	79,99	80,004	0,014
85	84,98	84,970	0,010
90	89,99	89,994	0,004
95	94,98	94,968	0,012
100	99,98	99,989	0,009
105	104,98	104,969	0,011
110	109,98	109,983	0,003
115	114,97	114,963	0,007
120	119,98	119,983	0,003
125	124,97	124,954	0,016
130	129,98	129,985	0,005
135	134,96	134,952	0,008
140	139,98	139,983	0,003
145	144,96	144,952	0,008
150	149,98	149,978	0,002
155	154,97	154,953	0,017
160	159,98	159,975	0,005
165	164,97	164,950	0,020
170	169,98	169,974	0,006
175	174,96	174,947	0,013
180	179,98	179,976	0,004
185	184,96	184,942	0,018
190	189,98	189,978	0,002
195	194,96	194,942	0,018
200	199,98	199,978	0,002
205	204,95	204,941	0,009
210	209,98	209,978	0,002
215	214,95	214,940	0,010
220	219,98	219,974	0,006
225	224,95	224,943	0,007
230	229,98	229,973	0,007
235	234,95	234,940	0,010
240	239,98	239,976	0,004
245	244,95	244,932	0,018
250	249,99	249,981	0,009
255	254,94	254,930	0,010
260	259,99	259,980	0,010
265	264,94	264,932	0,008
270	269,99	269,977	0,013
275	274,94	274,932	0,008
280	279,98	279,973	0,007
285	284,94	284,931	0,009
290	289,98	289,974	0,006
295	294,94	294,932	0,008
300	299,99	299,975	0,015
305	304,93	304,900	0,030
310	309,99	309,975	0,015

Koordinaattimittauskoneen mittauksista ohjelmisto voi halkaisijan lisäksi laskea mm. akselin ympyrämaisyyden. Suurin osa tämän akselin ympyrämaisyydevirheistä on välillä 0,004 – 0,020 mm. Taulukossa laskettu erotus mittaustulosten välillä on vain suuntaa antava. Johtuen erilaisista mittaustavoista ja kappaleen muotovirheestä, ei tulosten tulisikaan olla täysin samoja.

Taulukossa 7.3.2 on potkuriakselin mittaustulokset sekä pituusmittojen että geometrioiden osalta. Liitteessä 5 on mitatun akselin koneistuspiirustus, jossa on vaaditut toleranssit. Mittaustulosten mukaan akseli on kaikkien mitta- ja geometristen toleranssivaatimusten mukainen.

Taulukko 7.3.2 Potkuriakselin mittaustulokset

Nimi	Nimellismitta	Toleranssialue	Mittaustulos
Kartio 1:20	2,864°	-	2,860 °
Halkaisija kartio -10 mm	196,25 mm	± 0,05	196,251
Kokonaisheitto kartio		0,05	0,47
Halkaisija D220	220 mm	-0,072 - 0	219,964
Heitto D220		0,03	0,012
Halkaisija D220	220 mm	0,05 - 0,079	220,072
Lieriömäisyys D220		0,015	0,007
Halkaisija D239	239 mm	± 0,5	238,874
Aksiaaliheitto		0,02	0,006
Halkaisija D240	240 mm	0,445 - 0,476	240,442
Heitto D240		0,015	0,009
Aksiaaliheitto		0,02	0,007
Halkaisija D180	180 mm	0,003 - 0,028	180,021
Heitto D180		0,015	0,008
Aksiaaliheitto		0,02	0,008
Halkaisija D160	160 mm	0,027 - 0,052	160,041
Pituus 795	795 mm	± 0,5	794,971
Pituus 590	590 mm	± 0,5	590,001
Pituus 25	25 mm	± 0,5	24,865
Pituus 269	269 mm	± 0,5	268,941

7.3.2 Ylärunko

Ylärunгон koordinaattimittauksen tulokset ovat taulukossa 7.3.3. Liitteessä 6 on mitatun ylärunгон koneistuspiirustus, josta nähdään kappale ja sen mitoitus. Tuloksissa on punaisella merkitty mittaustulokset, jotka eivät ole toleranssialueen sisällä. Lisäksi kursiiivilla kirjoitetut nimet ovat kohteita, joissa ylemmän kohdan kohtisuoruusvertailu on käännetty toisin päin, eli alkuperäistä peruselementtiä verrataan mitoitettuun elementtiin. Käännön avulla nähdään, mikä on peruselementin vaikutus mittaustulokseen. Koska kappaleen piirustuksissa määriteltujen peruselementtien pituus on niin pieni, syntyy siitä suuri epävarmuus mittaustuloksiin elementtien välistä kohtisuoruutta mitattaessa. Kun vertailu käännetään toisin päin, ja reikää verrataan huomattavasti laajempaan tasoon, pienenee mahdollisen mittausvirheen vaikutus tulokseen.

Taulukko 7.3.3 Ylärunгон mittaustulokset.

Nimi	Nimellismitta	Toleranssialue	Mittaustulos
Halkaisija D1606	1606 mm	-0,1 - (-0,3)	1605,749
Samankeskeisyys D1606 - D650		0,2	0,039
Kohtisuoruus taso D1606 - elementti B		0,2	0,085
<i>Kohtisuoruus elementti B - taso D1606</i>		0,2	0,001
Halkaisija D650	650 mm	0,000 - 0,080	650,038
Lieriömäisyys D650		0,02	0,014
Kohtisuoruus taso D650 - elementti B		0,05	0,014
<i>Kohtisuoruus elementti B - taso D650</i>		0,05	0,001
Halkaisija D490	490 mm	0,000 - 0,063	490,056
Lieriömäisyys D490		0,02	0,016
Kohtisuoruus taso D490 - elementti A		0,05	0,104
<i>Kohtisuoruus elementti A - taso D490</i>		0,05	0,005
<i>Kohtisuoruus taso D490 - linja D490 - D455</i>		0,05	0,088
Halkaisija D455	455 mm	0,000 - 0,063	455,088
Kohtisuoruus taso D455 - elementti A		0,05	0,094
<i>Kohtisuoruus elementti A - taso D490</i>		0,05	0,005
<i>Kohtisuoruus taso D490 - linja D490 - D455</i>		0,05	0,079
Samankeskeisyys D455 - D490		0,05	0,247
Akseleiden risteily		± 0,05	0,138
Akseleiden välinen kulma	90°	± 0,017°	90,014°

Akselilinjan risteilytoleranssi ei näy liitteen 6 kuvassa, mutta se rajoittaa yksinkertaisesti akselilinjoiden etäisyyttä toisistaan teoreettisessa leikkauspisteessä. Kohtisuoruuksien mittauksessa on ongelmana peruselementtien A ja B pieni koko. Molemmat peruselementit ovat vain n. 30 mm pitkiä, kun näin lyhyeen elementtiin verrataan huomattavasti laajempia tasoja, kasvattaa pienikin mittausvirhe kohtisuoruuden virhettä huomattavasti. Kun kohtisuoruuden vertailu on käännetty toisinpäin, ovat tulokset huomattavasti parempi ja selvästi toleranssin sisällä.

Selvä poikkeama havaittiin reikien D455 ja D490 samankeskeisyydessä, joka vaikuttaa myös akseleiden risteilyyn. Akseleiden välisen kulman mittaustulos on vaatimuksen sisällä. Reikä D455 on mittausten mukaan hieman iso, mutta muuten tulokset ovat toleranssien mukaisia.

7.3.3 Alarungot

Ensimmäisenä mitatun, näistä kahdesta suuremman, potkurilaitteen alarungon mittaustulokset ovat taulukossa 7.3.4 ja liitteessä 7 on alarunkojen koneistuspiirustukset. Taulukossa 7.3.5 on puolestaan pienemmän mallin alarungon mittaustulokset. Kuten ylärunгон mittauksessa, tuloksissa on punaisella merkitty mittaustulokset, jotka eivät ole toleranssialueen sisällä. Lisäksi sarkaimella kirjoitetut nimet ovat kohteita, joita ei piirustuksissa ole toleroitu. Niissä ylemmän kohdan

kohtisuoruusvertailu on käännetty toisin päin, jotta saadaan parempi käsitys todellisesta tilanteesta.

Taulukko 7.3.4 Suuremman alarungon mittaustulokset.

Nimi	Nimellismitta	Toleranssialue	Mittaustulos
Halkaisija D950	950 mm	0,000 - 0,090	950,089
Kohtisuoruus taso D950 - elementti B		0,15	0,095
Heitto D950 - linja A-B		0,02	0,033
Halkaisija D420	420 mm	0,000 - 0,063	420,027
Lieriömäisyys D420		0,02	0,014
Halkaisija D400,5	400,5 mm	0,000 - 0,097	400,578
Heitto D400,5 - linja C-D		0,02	0,016
Halkaisija D400	400 mm	0,062 - 0,119	400,095
Lieriömäisyys D400		0,015	0,010
Kohtisuoruus taso D400,5 - elementti C		0,25	0,349
Kohtisuoruus elementti C - taso D400,5		0,25	0,026
Yhdensuuntaisuus D400 - linja C-D			0,011
Akseleiden välinen kulma	90°	± 0,017°	89,996
Akseleiden risteily		± 0,063	0,112
Etäisyys 475	475 mm	± 0,5	475,099
Kohtisuoruus taso D570 - elementti A		0,15	0,035
Kohtisuoruus taso D845 - elementti A		0,15	0,077
Halkaisija D440	440 mm	0,00 - (-0,063)	439,984
Samankeskeisyys D440 - elementti A		0,1	0,072

Taulukko 7.3.5 Pienemmän alarungon mittaustulokset.

Nimi	Nimellismitta	Toleranssialue	Mittaustulos
Halkaisija D780	780 mm	0,000 - 0,080	780,072
Kohtisuoruus taso D780 - elementti B		0,1	0,100
Heitto D780 - linja A-B		0,015	0,027
Halkaisija D340	340 mm	0,000 - 0,057	340,060
Lieriömäisyys D340		0,015	0,005
Halkaisija D342	342 mm	0,000 - 0,089	342,089
Heitto D342 - linja C-D		0,015	0,010
Halkaisija D340	340 mm	0,018 - 0,075	340,068
Lieriömäisyys D340		0,015	0,006
Kohtisuoruus taso D342 - elementti C		0,20	0,048
Kohtisuoruus elementti C - taso D342		0,20	0,005
Yhdensuuntaisuus D342 - linja C-D			0,007
Akseleiden välinen kulma	90°	± 0,017°	89,999°
Akseleiden risteily		± 0,063	0,042
Etäisyys 475	400 mm	± 0,3	400,015
Kohtisuoruus taso D500 - elementti A		0,10	0,012
Kohtisuoruus taso D700 - elementti A		0,10	0,017
Halkaisija D355	355 mm	0,00 - (-0,057)	354,982
Samankeskeisyys D355 - elementti A		0,05	0,044

Näistä kahdesta laitteesta pienemmän mallin alarungon ainoat poikkeamat ovat reiän D780 säteisheitto akselilinjaan nähden ja halkaisija D340, joka on koneistettu hieman liian suureksi. Valmistuksessa reiät pyritään tekemään lähemmäksi toleranssialueen ylärajaa kokoonpantavuuden varmistamiseksi.

Suuremman mallin rungossa on myös liian suuri heitto reiän D950 ja akselilinjan välillä. Kohtisuoruus tason D400,5 ja elementin C välillä ei ole riittävä. Vaikka vertailu käännettynä kohtisuoruus onkin huomattavasti parempi, on poikkeama silti moninkertainen toiseen runkoon nähden. Tämä poikkeama vaikuttaa myös akseleiden risteilyyn, joka on myös ylittää toleranssivaatimuksen.

7.4 Laserseurain

Kaksipäiväisen koulutuksen aikana selvitettiin Leica Absolute Tracker - laserseuraimen mahdollisuuksia runkojen mittauksessa. Koulutuksessa käytiin lävitse laserseuraimen laitteisto ja harjoiteltiin alarungon mittausta. Leica lupaa laitteen maksimivirheeksi (MPE) = $\pm 15 \mu\text{m} + 6 \mu\text{m} / \text{m}$ ja $2,5 \times 5 \times 10 \text{ m}$ mittausavaruudessa parannetun tarkkuuden MPE = $\pm 10 \mu\text{m} + 5 \mu\text{m} / \text{m}$. Laitteeseen lisävarusteena saatavan T-Probe-mittauskärjen kanssa maksimivirheeksi 3D-pisteelle ilmoitetaan $100 \mu\text{m}$ alle 7 m etäisyyksille ja $30 \mu\text{m} + 10 \mu\text{m} / \text{m}$ yli 7 m etäisyyksille. [23]

Koska laserseurain tarvitsee suoran näköyhteyden mitattavaan kohteeseen, hankaloittaa se mittausten toteutusta. Laitetta on mahdollista siirtää kesken mittauksen kiinnittämällä koordinaatiston kiinteisiin pisteisiin ja mittaamalla ne uudestaan siirron jälkeen. Kokemusten perusteella tämä kuitenkin aiheuttaa virhettä mittauksissa. T-Probe-mittauskärki mahdollistaa mittauksen myös kulmien taakse ja näin laajentaa laitteiston käyttömahdollisuuksia. Kyseinen käsianturi kuitenkin kasvattaa mittausepävarmuuden liian suureksi potkurilaitteiden runkojen toleranssien mittaamiseksi.

Taulukossa 7.4 on mittaustulokset koulutuksessa käytetyn rungon kolmen reiän halkaisijoista sekä käsimittausvälinein että laserseuraimella. Huomattava ero on halkaisijaltaan 620 mm :n reiän mittaustuloksissa. Tämän selittää reiän vaikea paikka suhteessa laserseuraimen mittausten aikana, mikä teki mittauksesta erittäin hankalaa.

Taulukko 7.4 Leica laser tracker koulutuksessa saadut halkaisijamittaustulokset.

Nimellismitta	Toleranssialue	Käsimittausväline	Laserseurain
272 mm	0,017 - 0,069	272,03	272,031
270 mm	0,017 - 0,069	240,06	270,029
620 mm	0,000 - 0,070	620,02	620,104

Leican laserseuraimella voi mitata myös geometrisia toleransseja kuten sylinterimäisyyttä, kohtisuoruutta ja samankeskeisyyttä. Laitteen mittaustarkkuus on kuitenkin rajallinen, esimerkiksi n. $0,03 \text{ mm}$ yksittäiselle pisteelle avaruudessa. Laitteen

tarkkuus ei silloin riitä mittaamaan luotettavasti reiän sylinterimäisyyttä toleranssialueen ollessa 0,02 mm. Geometrinen elementtien mittauksessa mitattujen pisteiden tarkkuus on hyvin tärkeää. Kun verrataan kaukana toisistaan olevia elementtejä, pienikin virhe esimerkiksi peruselementin suunnan mittauksessa kertautuu nopeasti ja kasvattaa kohtisuoruuden mittaustulosta.

7.5 Nivelvarsikoordinaattimittauskone

Faron nivelvarsikoordinaattimittauskoneiden (NVKMK) myyjä oli esittelemässä laitteistoa. Laitteella mitattiin yksi ylärunko, jotta saatiin käsitys, mitä laitteella pystytään mittaamaan. NVKMK:n etuna on laitteen liikuteltavuus. Se voidaan viedä mitattavan kohteen luokse ja jopa kiinnittää kohteeseen esimerkiksi magneettijalalla.

Nivelvarsikoordinaattimittauskoneiden mittausalueet vaihtelevat 1,2 m aina 3,7 m. Mittausalue on puolipallon muotoinen ja NVKMK:n pituus on noin puolet alueen halkaisijasta. Faron nivelvarsikoordinaattimittauskoneiden yhden pisteen mittauksen toistotarkkuudet vaihtelevat. Ne ovat pienimmillä ja tarkimmilla koneilla $\pm 5 \mu\text{m}$ ja suurimmilla ja epätarkimmilla koneilla yli $\pm 100 \mu\text{m}$. NVKMK:n mittausepävarmuus kasvaa aina varren pidetessä, koska jokaisen nivelen kulmavirheen vaikutus kasvaa. [26]

Vaikka nivelvarsikoordinaattimittauskoneiden mittausalueet vaikuttavat suurilta, voi varren pituus loppua kesken, jos kohdetta joudutaan mittaamaan eri suunnista. Tällöin kappaleen nurkkien kiertämiseen kuluu iso osa NVKMK:n pituudesta. Tästä syystä nivelvarsikoordinaattimittauskoneiden mittausalue ei riitä potkurilaitteiden alarunkojen mittaukseen.

Esittelyssä oli Faron NVKMK mallia Quantum 8, 6-akselisena, jonka mittausalue on 2,4 m. Quantum on Faron tarkin mallisarja, tämän laitteen yhden pisteen toistotarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa $\pm 18 \mu\text{m}$. Laitteella mitattiin ylärungon eri elementtejä, jotta voitiin arvioida, miten mittaus onnistuu tämän tyyppiselle kappaleelle. NVKMK kiinnitettiin magneettijalalla suoraan runkoon kiinni. Tällöin kappale ja mittauslaite eivät pääse liikkumaan toisiinsa nähden. Kiinnitys näkyy kuvassa 7.5.



Kuva 7.5 Faro nivelvarsikoordinaattimittauskone kiinnitettynä potkurilaitteen ylärunkoon magneettijalalla.

Tällä kiinnityksellä ei voitu mitata ylärungon alapintaa, koska mittausvarren ulottuvuus ei riittänyt. Paremmalla, mahdollisesti ulkopuolisella, kiinnityspaikalla myös alapinnan mittaus saattaisi onnistua yhdellä kiinnityksellä. Faron NVKMK:a voidaan myös siirtää kesken mittauksen, samaan tapaan kuin Leican Laser Trackeria, mittaamalla joku hyvä laatuinen elementti ennen ja jälkeen siirron. Laitteiston ohjelmisto kykenee automaattisesti kohdistamaan NVKMK:n kappaleen koordinaatistoon. Siirrosta aiheutuu kuitenkin aina jonkin verran virhettä, eikä sitä kannata siksi tehdä turhaan.

Ylärungon lisäksi mitattiin RR-testeissä käytetyn testiakselin halkaisija 210 mm, joka on mitattu myös Zeiss-koordinaattimittauskoneella. Liitteessä 3 on koordinaattimittauskoneella mitattu tulos akselin ympyrämaisyydelle. Farolla akselin halkaisijaksi mitattiin 209,990 mm ja Zeissillä 209,978 mm. Molemmat mittaustulokset on laskettu käyttäen pienimmän neliösumman periaatetta. Mittaustulosten ero on 0,012 mm. Farolla akselista otettiin 29 pistettä, kun Zeissillä lähes 7000 pistettä. Olettaen Zeissillä saadun tuloksen olevan lähempänä todellista mittausta, ei 12 µm ero ole huono tulos laitteistoille, kun otetaan huomioon luvatut tarkkuudet. Tyypillisellä tämän kokoisella akselilla Rolls-Roycen potkurilaitteessa on 29 µm mittatoleranssi. Tässä tapauksessa Faron nivelvarsikoordinaattimittauskoneen mittausepävarmuus on liian suuri luotettavaan mittaukseen.

Nivelvarsikoordinaattimittauskoneiden vahvuuksia ovat niiden liikuteltavuus ja helppokäyttöisyys. NVKMK voidaan viedä mitattavan kappaleen luokse ja usein kiinnittää suoraan mitattavaan kohteeseen. Mittaus voidaan aloittaa nopeasti eikä kappaletta tarvitse esimerkiksi suunnata mitenkään. Faron mukana tarjottava ohjelmisto

on hyvin selkeä ja siinä on paljon automatisoituja ominaisuuksia. Mittaustulosten laskennan lisäksi ohjelmistolla voi tehdä myös mittausraportteja.

Ari Reutsalo on diplomityössään – ”Nivelvartisten koordinaattimittauskoneiden teollisuussovellukset” – tehnyt vertailumittauksia kahdella Faron nivelvarsikoordinaattimittauskoneella ja Mauserin koordinaattimittauskoneella. Hänen kokeessa kappale mitattiin molemmilla NVKMK:lla 3 kertaa ja kerran koordinaattimittauskoneella. Tulosten pohjalta hän arvioi, että NVKMK:lla voidaan mitata koneistetun reiän paikka $\pm 0,030$ mm tarkkuudella. Kokeessa mitattujen reikien halkaisijoiden mittaustulosten vaihteluväli NVKMK:lla oli 0,019 mm paitsi yhden reiän halkaisin kohdalla 0,031 mm. Suurin etu NVKMK:lle syntyi mittaukseen kuluva ajasta. Farolla mittaukseen kului noin 5 minuuttia ja Mauser koordinaattimittauskoneella noin 1 tunti. Osin suuri ero johtuu siitä, että koordinaattimittauskoneelle joudutaan tekemään oma mittausohjelma jokaiselle kappaleelle, kappaletta ensimmäisen kerran mitattaessa. [27]

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän diplomityön tavoitteena on ollut kartoittaa nykyisten mittausmenetelmien kyvykkyyttä mitata vaaditut toleranssit ja selvittää mahdollisia uusia mittausmenetelmiä. Lisäksi arvioitiin potkuriakselin ylä- ja alarungon toleranssien kriittisyyttä FVRA-menetelmällä. FVRA-tuloksista nähdään, mitkä elementit ovat laitteen toiminnan kannalta tärkeitä, miten valmistusprosessi kykenee toteuttamaan vaaditut toleranssit ja voidaanko elementtien toleranssit mitata luotettavasti.

Jo ennen RR-testejä voitiin päätellä vanhojen mikrometrien kärsivän riittämättömästä resoluutiosta vaadittujen toleranssien mittaamiseen. Korvaamalla vanhat analogiset mikrometrit, joissa on 0,01 mm resoluutio, uusilla digitaalisilla, joissa on 0,001 mm resoluutio, saataisiin tämä asia korjattua. Sisäpuolisten halkaisijoiden mittaukseen käytettävän tikkumikrometrin RR-arvo analogiselle mitalle oli 43 % ja digitaaliselle 28 %. Digitaalisen tikkumikrometrin RR-arvo on alle 30 % ja näin ollen hyväksyttävällä tasolla.

Ulkopuolisten halkaisijoiden mittaukseen testattiin digitaalisella näytöllä olevaa kaarimikrometriä ja asetettavaa hakatulkkia. Lyhyessä RR-testissä molempien mittojen RR-arvo oli hieman yli 30 %. Type 1 -testissä digitaalinen kaarimikrometri sai toistettavuuden RR-arvoksi 25 % ja hakatulkki 12 %. Type 1 -testillä saadaan selville myös mittauslaitteiden systemaattinen virhe. Tässä tutkimuksessa systemaattisen virheen arviointia vaikeutti testiakselin muotovirhe. Systemaattinen virhe oli kaikkein pienin digitaalisella kaarimikrometrillä, hakatulkin 25 mittaustuloksen keskiarvo poikkesi vain alle 0,003 mm referenssiarvosta. Pitkän RR-testin RR-arvo digitaaliselle kaarimikrometrille oli 48 % ja hakatulkkille 25 %, joten pitkän testin perusteella hakatulkki olisi ainoa hyväksyttävä mittausväline.

Asetettavaa hakatulkkia on kuitenkin ongelmallista käyttää tuotannossa, jossa on paljon erikokoisia halkaisijoita, jotka vaihtelevat koko ajan. Asettaminen mittapaloilla vie aikaa ja on hankalaa tuotantoympäristössä. Mahrin asetettavan hakatulkin mittaustulos yhdellä asetuksella on vain n. 0,7 mm. Tämä tarkoittaa, ettei mittalastua ja valmista kappaletta pystytä välttämättä mittaamaan samalla asetuksella. Kaarimikrometri on huomattavan helppokäyttöinen mittausväline tässä mielessä.

FVRA-tulosten perusteella potkurilaitteen toiminnan kannalta tärkeimmät mitat rungoissa on akselilinjoihin, ja sitä kautta akseleiden risteilyyn, vaikuttavat elementit.

Akseleiden asema toisiinsa nähden määrittelee sekä ylä- että alarungossa olevan hammasvaihteen hammaskosketuskuvion. Hammaskosketuskuvio ei salli juurikaan virhettä asennossa tai paikassa. Myös tiivisteet, jotka ovat kosketuksissa meriveden kanssa, ovat tärkeitä potkurilaitteen toiminnan kannalta.. Tiivisteiden on kestävä veden paineesta aiheutuvat rasitukset. Akseleissa tärkeitä elementtejä ovat laakerin- ja hammaspyörän paikkojen halkaisijat ja muoto sekä akselin heittotoleranssit. Laakerit ja hammaspyörät ovat kiinni akselissa ahdistusliitoksella. Jotta ahdistus on riittävän luja, ei akseli saa olla alamittainen. Liian suuri akselin halkaisija voi aiheuttaa liitosvoiman, joka voi vahingoittaa laakeria, hammaspyörää tai akselia, tai tehdä kokoonpanosta mahdottoman.

FVRA-tulokset osoittavat mittatoleranssien lisäksi useiden geometriatoleranssien vaativan mittausta valmistuksen jälkeen, jotta elementin FVRA-arvo saadaan hyväksyttävälle tasolle. Tämä edellyttää koordinaattimittausmahdollisuuksien kehittämistä. Akseleiden mittaukseen on olemassa kaupallisia, esimerkiksi optisia, laitteita, joilla akselin halkaisija, ympyrämäisyys ja heitto voidaan mitata nopeasti. Tähän asti selville saatujen laitteiden suurin mahdollinen akselin pituus rajoittuu yleensä 1000 mm ja suurin sallittu kuorma alle 100 kg. Näin ollen ne ovat liian pieniä Rolls-Royce Oy Ab:n valmistamien potkurilaitteiden akseleiden mittaukseen. Mittausjärjestelmiä valmistavan Hommelin verkkosivuilla tosin on maininta optisesta akselinmittauslaitteesta, jolla on mahdollista mitata jopa 2500 mm pitkiä akseleita. Tästä laitteesta ei kuitenkaan ole muita tietoja saatavilla.

Runkoja sekä akseleita on käytetty koordinaattimittauksessa ulkopuolisella palveluntarjoajalla. Näiden mittaustulosten pohjalta voidaan todeta oman valmistusprosessin tila ja puuttua mahdollisiin virhelähteisiin. Liikuteltavilla koordinaattimittausjärjestelmillä, kuten Leican laserseurain tai Faron nivelvarsikoordinaattimittauskone, on omat vahvuutensa, mutta ne eivät pärjää tarkkuudessa perinteisille koordinaattimittauskoneille. Potkurilaitteiden rungoissa on elementtejä, joiden mittaus tavallisella koordinaattimittauskoneella vaaditulla tarkkuudella on vaikeaa. Laserseuraimen tai nivelvarsikoordinaattimittauskoneen tarkkuus ei ole riittävä runkojen toleranssien luotettavaan mittaamiseen.

Sekä laserseuraimella että nivelvarsikoordinaattimittauskoneella voidaan mittauksia tehdä myös tuotantotiloissa tai vaikka kappaleen vielä ollessa kiinni työstökoneessa. Tavallinen koordinaattimittauskone vaatii mittaushuoneen, johon kone voidaan sijoittaa. Mittaushuone kaikkine rakenteineen, kuten koordinaattimittauskoneen perusta, ilmastointikone ja nosturi tai muu kappaleiden siirtolaite, kasvattavat vaadittavaa investointia huomattavasti. Kaikki koordinaattimittausjärjestelmät vaativat osaavia käyttäjiä, jotka täytyy kouluttaa. Lisäksi laitteita on käytettävä jatkuvasti, jotta ammattitaito säilyy. Lisäkuluja aiheuttavat kalibrointi ja huolto.

9 SUOSITUKSET

FVRA-tulosten perusteella kannattaa mittaukseen panostaa ja käsimittausvälineiden lisäksi kehittää geometriatoleranssien mittausta. FVRA olisi tehokkain jos analyysi päästäisiin tekemään uusien mallien osalta jo hyvissä ajoin suunnitteluvaiheessa, jolloin on vielä mahdollisuuksia tehdä muutoksia laitteen rakenteeseen. Jo tuotannossa olevien mallien kanssa analyysin hyöty rajoittuu mittaustarpeen kartoitukseen ja mahdollisiin pieniin parannuksiin valmistuksen osalta.

Käsimittausvälineiden RR-testi osoittaa sisäpuolisten halkaisijoiden mittauksessa päästävän hyväksyttävään tarkkuuteen vaihtamalla tikkumikrometrit 0,001 mm resoluutiolla oleviin digitaalisiin malleihin. Jos toleranssivaatimukset tulevaisuudessa kuitenkin kiristyvät, on harkittava muita vaihtoehtoja. Kyseeseen voi tulla silloin jokin hakatulkkin tavoin vertailumittaukseen perustuva laite, joka asetetaan ensin nimellis- tai tavoitemittaan, johon kappaletta sitten verrataan.

Akseleiden ulkopuolisten halkaisijoiden mittaukseen soveltuvien mittausvälineiden RR-testit eivät anna yksiselitteistä vastausta. Uusissa testatuissa mittauslaitteissa, sekä digitaalisessa kaarimikrometrissä että asetettavassa hakatulkissa, on omat heikkoutensa. Kaarimikrometrin RR-arvo ei viimeisessä pitkässä testissä alittanut hyväksyttävän tuloksen 30 % rajaa. Hakatulkilla mitattaessa toistettavuus on kaarimikrometriä parempi, mutta asetus on tuotantokäytössä, jossa kappaletta mitataan myös koneistuksen aikana, ongelmallista. Mittapaloja parempi tapa asetukseen olisi esimerkiksi Trimoksen pituuden mittauskone. Laitteella voi asetettavien hakatulkkien lisäksi asettaa muita vertailumittausvälineitä (esim. olakemittauslaite), tarkistaa tikkumikrometrin nollakohdan asetus ja kalibroida mittausvälineitä. Trimoksen pituuden mittauskoneiden hinnat alkavat noin 25 000 eurosta, mallista ja mittausalueen pituudesta riippuen.

Akseleiden mittauksessa on perusteltua vaihtaa perinteiset analogiset kaarimikrometrit digitaalisiin, jolloin päästäisiin eroon resoluutio-ongelmasta ja saataisiin pienennettyä epävarmuutta jonkin verran. Koneistajat mittaisivat kaikki kappaleet mikrometrillä, joka on heille hyvin tuttu mittausväline. Tämän lisäksi käytössä voisi olla yksi sarja mikrometrejä tarkempia mittauslaitteita, esimerkiksi hakatulkkkeja, joilla tehtäisiin tarkistusmittauksia kaikkein kriittisimmille halkaisijoille. Tästä tosin aiheutuu ylimääräistä työtä mikä vaatii lisäresursseja. Kaikkien Rolls-Royce Oy Ab:n Rauman osavalmistuksen mikrometrien vaihtaminen digitaalisiin malleihin maksaisi n. 50 000

euroa. Asetettavat hakatulkit maksavat noin 2 000 euroa kappale ja Kordt Cordameter noin 3 000 – 4 000 euroa kappale.

Koordinaattimittauksen osalta suositellaan jatkamaan runkojen mittauttamista ulkopuolisella palveluntarjoajalla, muutaman kerran vuodessa. Mitattavien runkojen valmistuksesta täytyy pitää kirjaa, milloin ne on valmistettu, millä koneella ja alarungon osalta kummalla pöydällä ne ovat työstökoneessa olleet. Näiden tulosten pohjalta voidaan tarkkailla valmistusprosessia ja useamman mittauskerran jälkeen saadaan käsitys mikä on valmistuksessa syntyvä runkojen mittojen todellinen vaihteluväli.

Pitkällä aikavälillä kannattaa arvioida oman koordinaattimittauskoneen hankintaa. Runkojen lähettäminen mitattavaksi vie aikaa, ja viivytyksiä voi aiheutua myös mittauksia tekevän yrityksen aikatauluista. Omalla koneella voidaan mitata enemmän kappaleita ja saadaan tietoa valmistusprosessista nopeammin ja enemmän. Ulkopuolelta ei ainakaan tällä hetkellä ole saatavissa palvelua, jolla alarunko voitaisiin mitata suulake kiinni hitsattuna. Koordinaattimittauskoneen hankinta on suuri investointi, joka vaatii lisäksi jatkuvasti resursseja käyttöön ja huoltoon. Rolls-Roycen potkurilaitteiden runkojen mittaukseen soveltuvan koordinaattimittauskoneen hinnaksi tulisi, mittaushuoneen ja muiden vaadittavien rakenteiden kanssa, alustavien arvioiden perusteella noin 1 – 1,5 miljoonaa euroa. Käyttöä varten tarvitaan todennäköisesti kaksi henkilöä ja lisäksi joku analysoimaan tulokset.

Jos mittaustuloksia olisi käytettävissä huomattavasta osasta runkoja, voitaisiin paremmin arvioida kokoonpanossa vastaan tulevien ongelmien lähdettä. Tällöin olisi myös mahdollista selvittää, miten runko todellisuudessa vaikuttaa hammasvaihteiden hammaskosketuskuvioon ja minkälaisia toleransseja todellisuudessa voidaan sallia.

Laserseurainta ja nivelvarsikoordinaattimittauskonetta voitaisiin hyödyntää havaitun ongelman selvittämiseen tai raakatarkastusten tekemiseen. Niiden tarkkuus ei riitä tällaisten kappaleiden täydelliseen tarkastamiseen luotettavasti. Usein myös vaatimukset tiukkenevat uusien potkurilaitte mallien mukana.

Koneistajille, jotka tällä hetkellä mittaavat kappaleet osavalmistuksessa, voisi olla järkevää järjestää lyhyt koulutus mittauksesta, siihen liittyvästä teoriasta ja yleisesti mittaajärjestelyistä. Vaikka lämpötilan vaikutus mittaustulokseen tunnetaan ja mittaustaito, tehtyjen testien perusteella, on hyvällä tasolla, ei esimerkiksi mittaasepävarmuuden käsite ole laajasti tiedossa. Aina ei myöskään muisteta tarkastaa mikrometrin nollakohdan paikkansapitävyyttä ennen mittausta.

Tulevaisuudessa mittauskyvyn arviointi kannattaa ulottaa myös alihankkijoihin, jotka valmistavat noin puolet potkurilaitteiden rungoista ja suurimman osan kaikista käytetyistä osista. Alihankkijoiden tilanteen kartoittamisessa ja mahdollisissa

parannustoimissa voi olla suuri työ ja vaikea löytää yhteistä tahtotilaa investointeihin. Alihankkijoiden toimittamat osat vaikuttavat laitteen toimintaan samalla tavalla kuin itse valmistetut osat. Myös alihankkijoiden toimittamia osia pitää mitata laadun varmistamiseksi. Jos osan viallisuus havaitaan vasta juuri ennen kokoonpanon aloitusta tarkastuksessa tai kokoonpanossa, joudutaan osa usein lähettämään muualle korjattavaksi tai odottamaan uutta osaa, mikä aiheuttaa turhaa viivytystä ja kustannuksia.

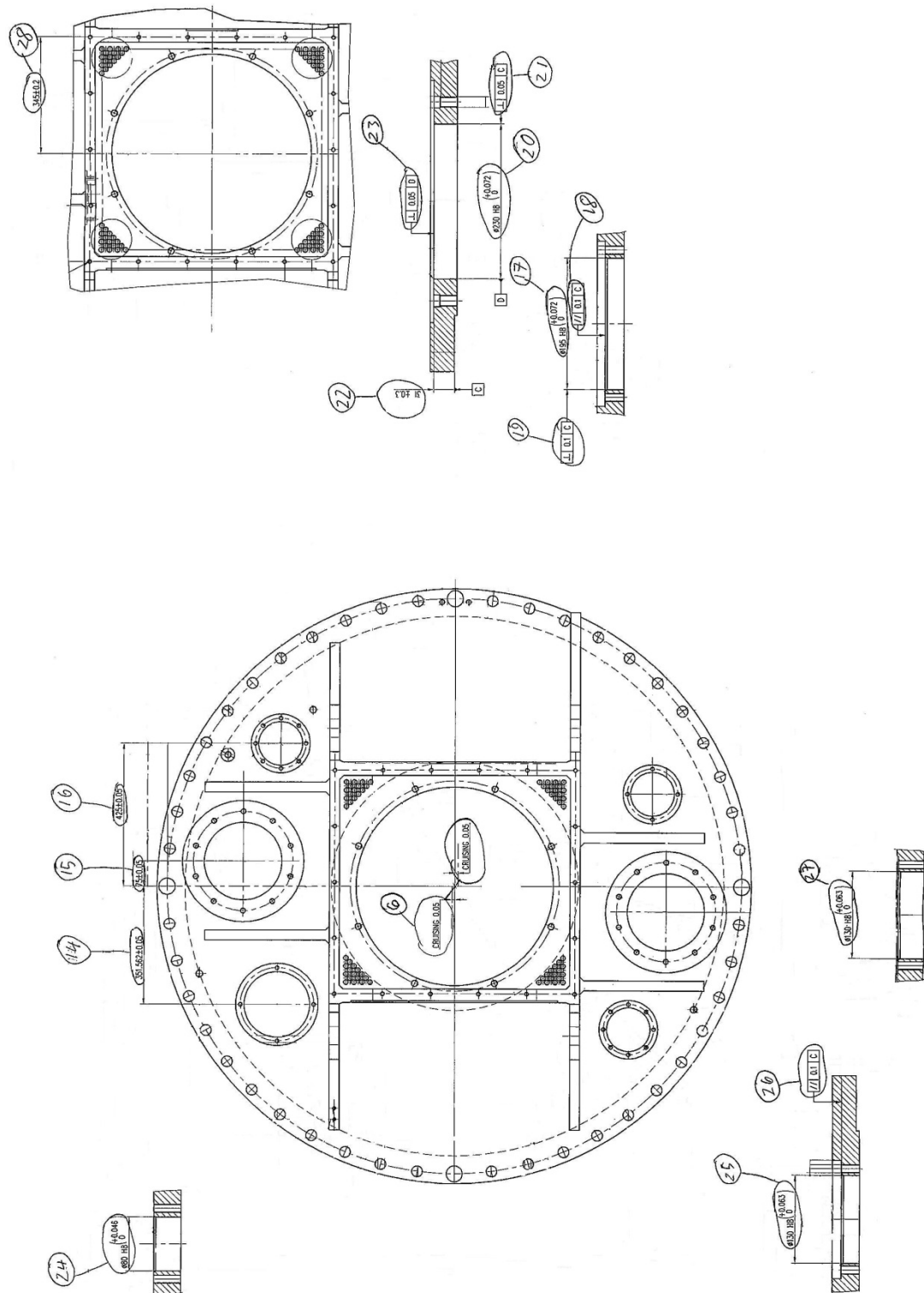
LÄHTEET

- [1] Rolls-Royce Annual report 2010. [WWW]. [Viitattu 15.6.2011]. Saatavissa: http://www.rolls-royce.com/Images/RR_full_AR_2010_tcm92-26816.pdf
- [2] Rolls-Royce Marine. [WWW]. [Viitattu 15.6.2011]. Saatavissa: <http://www.rolls-royce.com/marine/>
- [3] Monitoimimurtajat [WWW]. [Viitattu 15.6.2011]. Saatavilla: http://www.arctia.fi/yleista_monitoimimurtajista
- [4] SFS-käsikirja 19 Suureet ja yksiköt. SI-mittayksikköjärjestelmä. 3. uudistettu painos. Helsinki 2001. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 248 s.
- [5] Konepajan mittaustekniikka. 1987, Metalliteollisuuden Kustannus Oy. 249 s.
- [6] Paul H. Andersson, Heikki Tikka. Mittaus- ja laatutekniikka. 1. painos. Porvoo 1997. WSOY. 323 s.
- [7] Veli-Pekka Esala, Heikki Lehto, Heikki Tikka. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Tekninen tiedotus 3 2003. Tampere 2003. Tammer-paino Oy. 79 s.
- [8] JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement. [WWW]. [Viitattu 11.7.2011]. Saatavissa: http://www.bipm.org/utls/common/documents/jcgm/JCGM_100_2008_E.pdf
- [9] Björn Hemming. Mittausepävarmuus. 2010. MIKES. [WWW]. [Viitattu 15.7.2011]. Saatavilla: http://www.mikes.fi/documents/upload/04-hemming_epavarmuus_2010.pdf
- [10] Mitutoyo catalog US. [WWW]. [Viitattu 21.7.2011]. Saatavilla: http://www.mitutoyo.com/Manuals/Catalog_US-1001.pdf
- [11] Mahr products. [WWW]. [Viitattu 22.7.2011]. Saatavilla: <http://www.mahr.com/index.php?NodeID=8282>
- [12] SFS-EN ISO 3650:1998. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Pituudenmittauslaitteet. Mittapalat. 1999. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 20 s.
- [13] SFS-ISO 8015. Tekniset piirustukset. Toleroinnin peruseriaatteen. 1987. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 7 s.

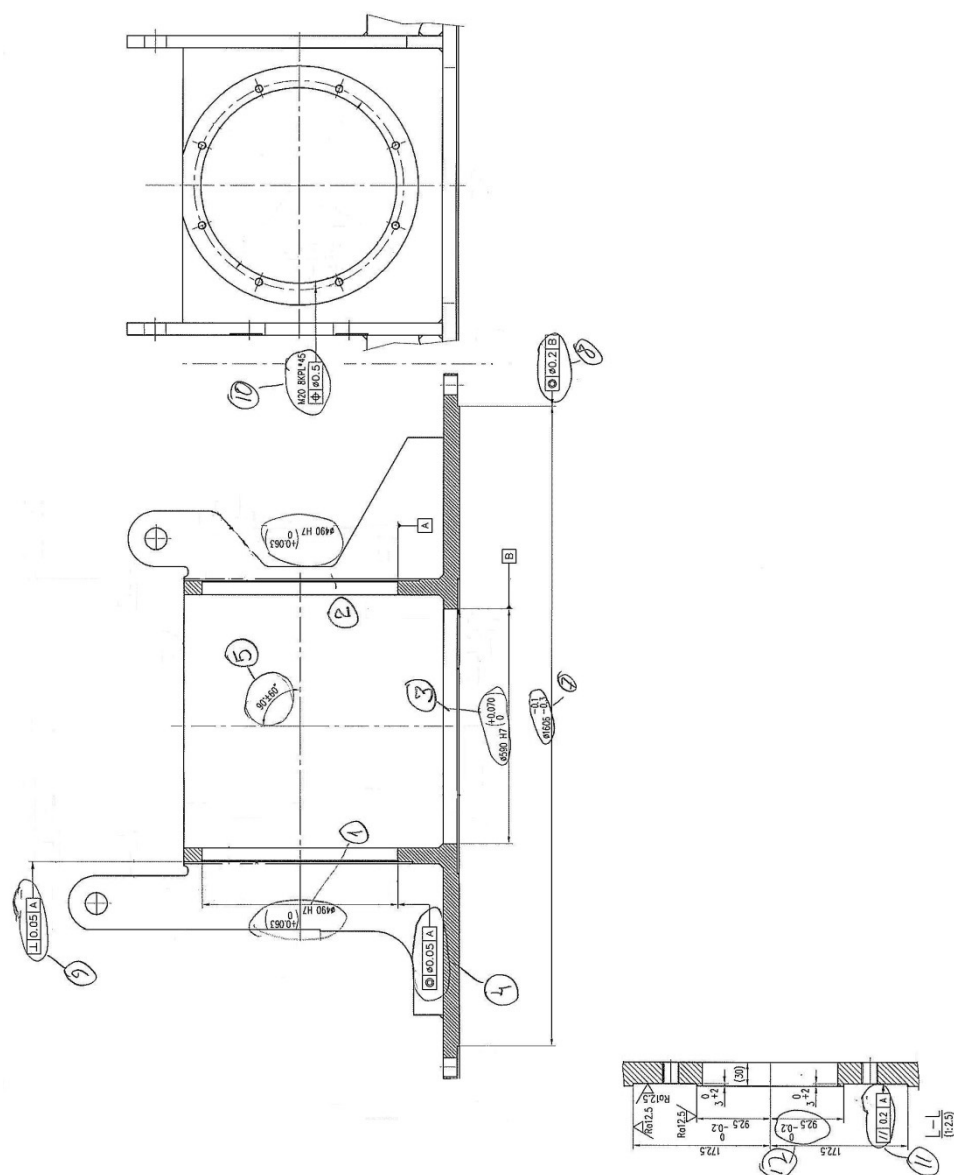
- [14] SFS-EN ISO 2692. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Geometrinen tolerointi. Maksimimateriaalin vaatimus (MMR), vähimmäismateriaalin vaatimus (LMR) ja vastavuoroisuuden vaatimus (RPR). 2007. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 67 s.
- [15] SFS-EN ISO 286-1. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Pituusmittojen toleranssien iso-markintäjärjestelmä. Osa 1: Toleranssien, eromittojen ja sovitteiden perusteet. 2010. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 80 s.
- [16] Heikki Lehto. Menorajan periaate. Mikes [WWW]. [Viitattu 5.8.2011]. Saatavilla: http://www.mikes.fi/documents/upload/07-menorajan_periaate-hl.pdf
- [17] Mitä on GPS? Metalliteollisuuden Standardisointiyhdistys ry. [WWW]. [Viitattu 15.8.2011]. Saatavilla: http://www.mikes.fi/documents/upload/02-geometristen_toleranssien_teemapaiva-mita_on_gps.pdf
- [18] SFS-EN ISO 1101. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Geometriset toleranssit. Muodon, suunnan, sijainnin ja heiton toleranssit. 2006. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 116 s.
- [19] Feature Verification Risk Analysis. 2009. Rolls-Royce infocentre. (Ei julkinen)
- [20] Heikki Tikka. Koordinaattimittaus. 1. painos. Tampere 2007. Tampereen Yliopistopaino Oy – Juvenes Print. 473 s.
- [21] Zeiss koordinaattimittauskoneet. [WWW]. [Viitattu 19.10.2011]. Saatavilla: <http://www.zeiss.com/metrology>
- [22] Faro Mittausvarsi. [WWW]. [Viitattu 19.10.2011]. Saatavilla: <http://rensi.fi/fin/products/mittauslaitteet-ja-skannerit/faro-mittausvarret/>
- [23] Leica lasertracker. [WWW]. [Viitattu 20.10.2011]. Saatavilla: http://metrology.leica-geosystems.com/en/Laser-Tracker-Systems_69045.htm
- [24] Kalevi Aaltonen. GPS – Uuudet tuulet toleroinnissa. [WWW]. [Viitattu 21.10.2011]. Saatavilla: http://www.mikes.fi/documents/upload/06-gps_aaltonen.pdf
- [25] Rolls-Royce Lean Sigma Toolkit v2 (Black Belt). 2009. Rolls-Royce infocentre. (Ei julkinen)

- [26] Faro nivelvarsikoordinaattimittauskone. 2011. [WWW]. [Viitattu 14.11.2011]. Saatavilla: <http://rensi.fi/fin/products/mittauslaitteet-ja-skannerit/faro-mittausvarret/>
- [27] Ari Reutsalo. Nivelvartisten koordinaattimittauskoneiden teollisuussovellukset. Diplomityö, Teknillinen Korkeakoulu. Espoo 2009. 99 s.
- [28] Trimos asetuslaite. 2011. [WWW]. [Viitattu 17.11.2011]. Saatavilla: http://www.trimos.ch/lowres_e.html
- [29] Kordt Cordameter. 2011. [WWW]. [Viitattu 17.11.2011]. Saatavilla: <http://www.kordt.de/start.php>
- [30] SFS-EN ISO 14253-1. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Työkappaleiden ja mittauslaitteiden tarkastus mittaamalla. osa 1: Ratkaisuhjeet määrittelynmukaisuuden tai -vastaisuuden toteamiseksi. 1999. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 20 s.
- [31] Heidenhain. 2011. [WWW]. [Viitattu 17.11.2011]. Saatavilla: <http://www.heidenhain.fi/>
- [32] SFS-EN ISO 10350-1. Geometrical Product Specifications (GPS). Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines (CMM). Part 1: Vocabulary2000. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 52 s.
- [33] SFS-EN ISO 5458. Geometrinen tuotemäärittely (GPS). Geometrinen tolerointi. paikkatolerointi. Suomen standardoimisliitto SFS ry. 28 s.

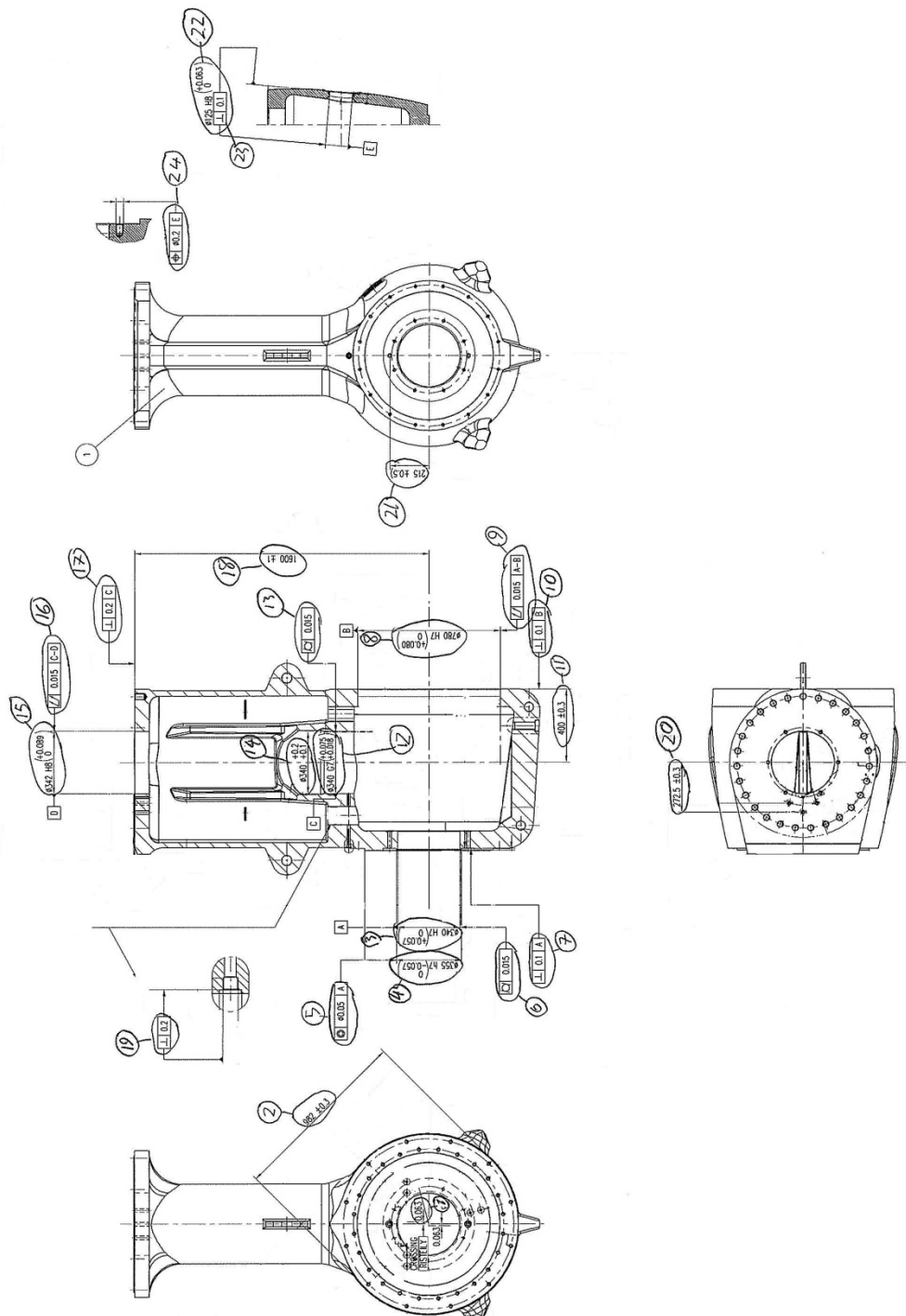
Ylärunko sivu 1/2



Ylärunko sivu 2/2



Alarunko



LIITE 2

RR-tutkimus, lyhyt menetelmä

Mittaaja: Petri Ahomäki
 Anna mittausten toistomäärä: 3 kerta
 Anna kappaleiden lukumäärä: 6 kpl
 Mittauslaite ja resoluutio: Mikrometri 1/100mm No 254 (200-225 mm)
 Koekappale: RR-kappale (jouluuusiaksi)
 KPL toleranssi: 0,029 mm
 Päivämäärä ja paikka: 9.8.2011 Rauma 22 °C

Mittaaja	Petri	Petri	Petri	
No.	1. koe	2. koe	3. koe	Ero
1	199,990	199,980	199,980	0,010
2	204,940	204,940	204,930	0,010
3	209,980	209,990	209,990	0,010
4	214,940	214,940	214,940	0,000
5	219,980	219,990	219,980	0,010
6	224,930	224,940	224,940	0,010
Yhteensä	1274,760	1274,780	1274,760	0,050
		1274,760	R	0,008
		1274,760		
	Sum	3824,300		
	Xa	212,461		

Valitse d2-arvo taulukon 3 sarakkeesta 3 riviltä 10

-----→ D2 = 1,73

LASKENTAA:

RR-luku:

$RR = 5,15 \cdot R/(d2) = 0,0248\text{mm}$ (= epävarmuus ilman systemaattisia virheitä)

RR-prosentti:

$RR\% = RR/dL \cdot 100 = 85,54\%$ toleranssista

RR-tutkimus, lyhyt menetelmä

Mittaaja: Petri Ahomäki
 Anna mittausten toistomäärä: 3 kerta
 Anna kappaleiden lukumäärä: 6 kpl
 Mittauslaite ja resoluutio: Mikrometri 1/1000 mm (200-225 mm)
 Koekappale: RR-kappale (jouluukuusiakseli)
 KPL toleranssi: 0,029 mm
 Päivämäärä ja paikka: 29.8.2011 Rauma 22 °C

Mittaaja	Petri	Petri	Petri	
No.	1. koe	2. koe	3. koe	Ero
1	199,971	199,973	199,974	0,003
2	204,926	204,928	204,926	0,002
3	209,972	209,975	209,976	0,004
4	214,924	214,928	214,928	0,004
5	219,966	219,970	219,966	0,004
6	224,928	224,927	224,928	0,001
Yhteensä	1274,687	1274,701	1274,698	0,018
		1274,687	R	0,003
		1274,698		
	Sum	3824,086		
	Xa	212,449		

Valitse d2-arvo taulukon 3 sarakkeesta 3 riviltä 10

-----→ D2 = 1,73

LASKENTAA:

RR-luku:

$RR = 5,15 \cdot R/(d2) = 0,0089\text{mm}$ (= epävarmuus ilman systemaattisia virheitä)

RR-prosentti:

$RR\% = RR/dL \cdot 100 = 30,80\%$ toleranssista

RR-tutkimus, lyhyt menetelmä

Mittaaja: Petri Ahomäki
 Anna mittausten toistomäärä: 3 kertaa
 Anna kappaleiden lukumäärä: 6 kpl
 Mittauslaite ja resoluutio: Hakatulkki 1/1000 mm (200-250 mm)
 Koekappale: RR-kappale (jouluukuusiakseli)
 KPL toleranssi: 0,029 mm
 Päivämäärä ja paikka: 10.8.2011 Rauma 22,5 °C

Mittaaja	Petri	Petri	Petri	
No.	1. koe	2. koe	3. koe	Ero
1	199,963	199,964	199,964	0,001
2	204,918	204,921	204,919	0,003
3	209,967	209,966	209,968	0,002
4	214,922	214,914	214,913	0,009
5	219,958	219,958	219,958	0,000
6	224,917	224,922	224,921	0,005
Yhteensä	1274,645	1274,645	1274,643	0,020
		1274,645	R	0,003
		1274,643		
	Sum	3823,933		
	Xa	212,441		

Valitse d2-arvo taulukon 3 sarakkeesta 3 riviltä 6

-----→ D2 = 1,73

LASKENTAA:

RR-luku:

$RR = 5,15 \cdot R/(d2) = 0,0099\text{mm}$ (= epävarmuus ilman systemaattisia virheitä)

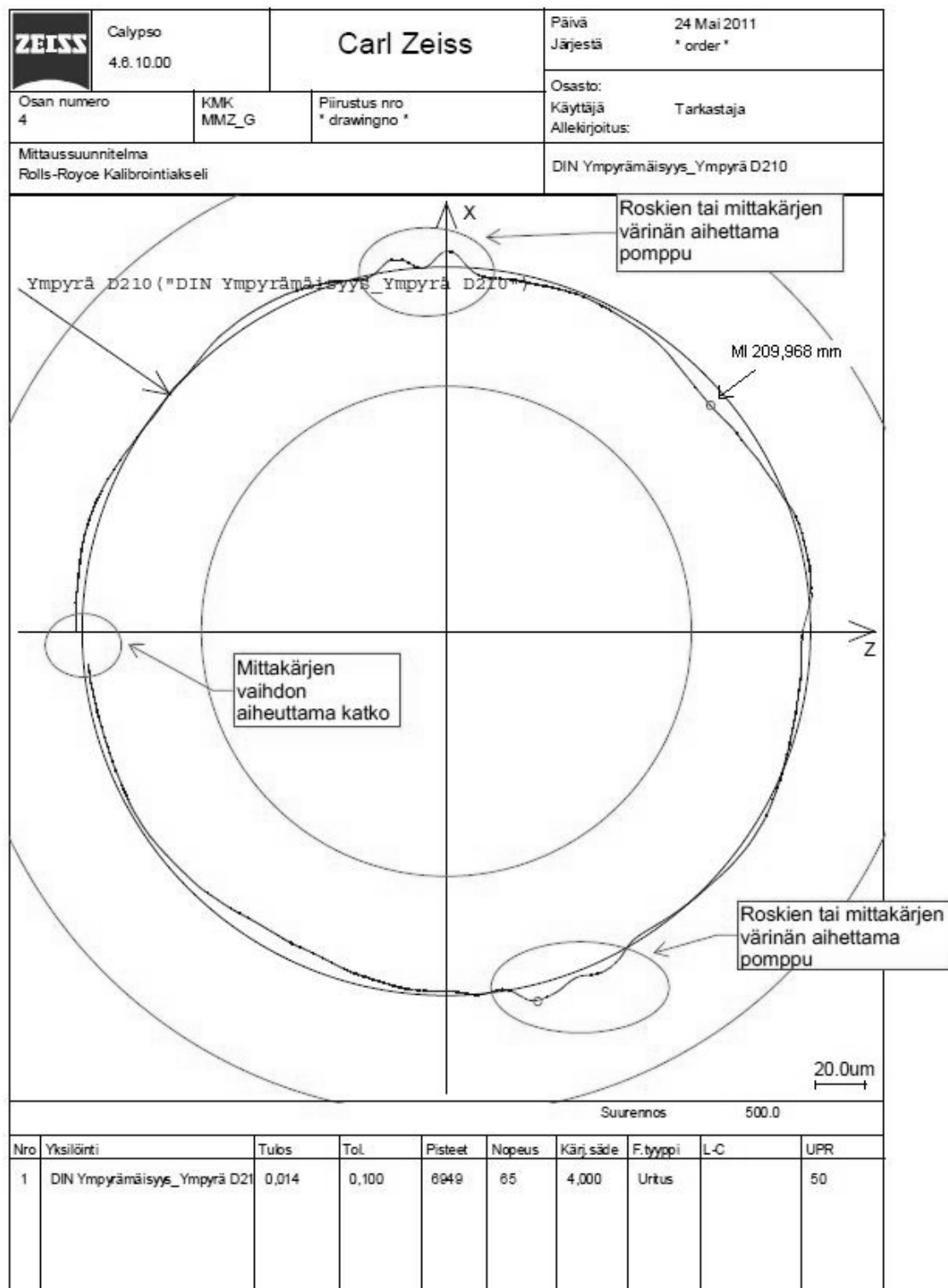
RR-prosentti:

$RR\% = RR/dL \cdot 100 = 34,22\%$ toleranssista

Mittapalasarja MPS 001

LIITE 3

Testiakselin halkaisijan 210 mm ympyrämaisyyys koordinaattimittauskoneella mitattuna.



LIITE 4

RR-tutkimus, pitkä menetelmä

Yrittäjä:

Mittaja:

Anna mittausten toistokerta: 3 kertaa

Anna kappaleiden lukumäärä: 5 kpl

Anna mittaajien lukumäärä: 3 henk.

Mittalaite ja resoluutio: Mikrometri 1/100 mm

No: 254

Koekappale: Kalibrointiakseli

KPL toleranssi: 0,029 mm

Päivämäärä ja paikka: Rauma 19.9.2011

A. Aaltonen

B. Seppälä

C. Haikonen

Mittaja	A				B				C			
No.	1. koe	2. koe	3. koe	Ero	1. koe	2. koe	3. koe	Ero	1. koe	2. koe	3. koe	Ero
1	199,98	199,98	199,98	0,000	199,97	199,97	199,97	0,000	199,97	199,97	199,97	0,000
2	204,93	204,93	204,93	0,000	204,93	204,93	204,93	0,000	204,93	204,93	204,93	0,000
3	209,97	209,97	209,97	0,000	209,97	209,97	209,97	0,000	209,97	209,97	209,97	0,000
4	214,93	214,93	214,93	0,000	214,93	214,93	214,93	0,000	214,93	214,93	214,93	0,000
5	219,97	219,97	219,97	0,000	219,97	219,97	219,97	0,000	219,97	219,97	219,97	0,000
Yhteensä	1049,780	1049,780	1049,780	0,000	1049,770	1049,770	1049,770	0,000	1049,770	1049,770	1049,770	0,000
		1049,780				1049,770				1049,770		
	Sum	3149,340			Sum	3149,310			Sum	3149,310		
	Xa	209,956			Xb	209,954			Xc	209,954		
Ra	0,0000											
Rb	0,0000											
Rc	0,0000											
Sum	0,0000											
R	0,0000											
			Koe	D4			R x D4	=UCLR			MAX x	209,9560
			2	3,27			0,00	2,53	0,0000		MIN x	209,9540
			3	2,58							Xero	0,0020
ARVIOINTIRAPORTTI R = 0,0000 Xero = 0,0020 Toleranssi: 0,029												
MITTALAITEARVIOINTI												
Toistettavuus EV:				Mittauskertoja				TOLERANSSIANALYYSI				
(Laitevaihtelu)				Koe 2 3				EV% = EV * 100 / TOL				
EV = R * K1				K1 4,56 3,05				0,0000 * 100 / 0,029				
= 0,0000 * 3,05				Tarkista tämä kohta				= 0,0 %				
EV = 0,000 mm												
Uusittavuus AV:				Henk. 2 3				AV% = AV * 100 / TOL				
AV = sqrt ((Xero * K2) ^ 2 - ((EV) / (n * r))				K2 3,65 2,7				0,0054 * 100 / 0,029				
(Xero * K2) ^ 2 = 0,00003								= 18,6 %				
(EV) ^ 2 / (n * r) = 0,00000												
AV = 0,005 mm												
Toistettavuus ja uusittavuus RR:								RR% = RR * 100 / TOL				
RR = EV + AV								0,005 * 100 / 0,029				
= 0,0000 + 0,0054								= 18,6 %				
RR = 0,005 mm												

RR-tutkimus, pitkä menetelmä

Yritys:

Mittaja:

Anna mittauksen toistokerta: 3 kerta

Anna kappaleiden lukumäärä: 5 kpl

Anna mittajien lukumäärä: 3 henk.

Mittalaite ja resoluutio: Mikrometri 1/1000 mm

No:

Koekappale: Kalibrointiakseli

KPL toleranssi: 0,029 mm

Päivämäärä ja paikka: Rauma 19.9.2011

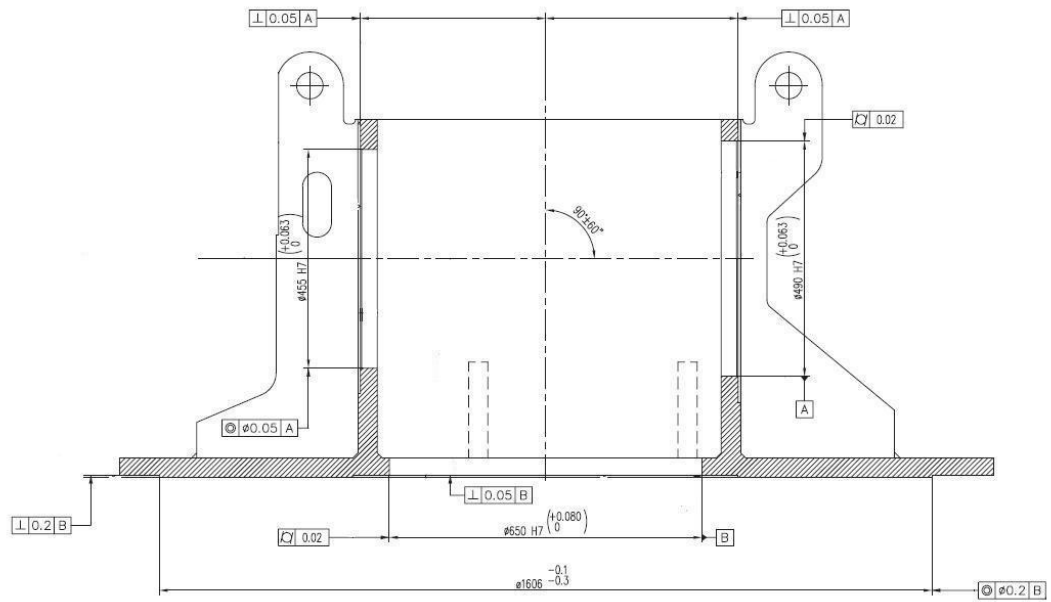
A. Aaltonen

B. Seppälä

C. Haikonen

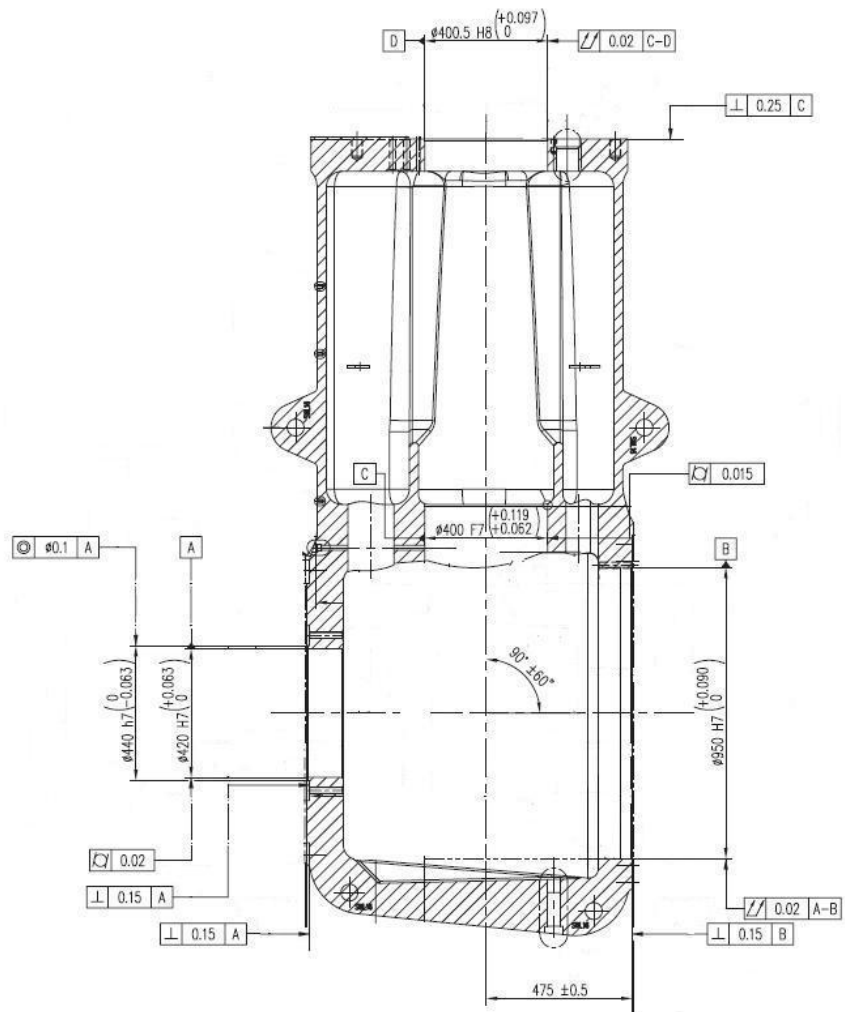
Mittaja		A				B				C			
No.	1. koe	2. koe	3. koe	Ero	1. koe	2. koe	3. koe	Ero	1. koe	2. koe	3. koe	Ero	
1	199,972	199,971	199,971	0,001	199,981	199,976	199,975	0,006	199,978	199,973	199,975	0,005	
2	204,929	204,927	204,928	0,002	204,931	204,936	204,931	0,005	204,936	204,934	204,929	0,007	
3	209,965	209,970	209,969	0,005	209,972	209,976	209,971	0,005	209,972	209,974	209,973	0,002	
4	214,932	214,926	214,927	0,006	214,927	214,928	214,929	0,002	214,929	214,930	214,930	0,001	
5	219,971	219,970	219,970	0,001	219,972	219,966	219,971	0,006	219,971	219,972	219,969	0,003	
Yhteensä	1049,769	1049,764	1049,765	0,015	1049,783	1049,782	1049,777	0,024	1049,786	1049,783	1049,776	0,018	
		1049,769		0,003		1049,783		0,005		1049,786		0,004	
		1049,765				1049,777				1049,776			
Sum		3149,298			Sum	3149,342			Sum	3149,345			
Xa		209,9532			Xb	209,9561			Xc	209,9563			
Ra	0,0030												
Rb	0,0048		Koe	D4			R x D4	=UCLR			MAX x	209,9563	
Rc	0,0036		2	3,27							MIN x	209,9532	
Sum	0,0114		3	2,58			0,00	2,58	0,0098		Xéro	0,0031	
R	0,0038												

ARVIOTIRAPORTTI																
R =				C,0038				Xéro =		0,0031		Toleranssi			0,029	
MITTALAITEARVIOINTI							TOLERANSSIANALYYSI									
Toistettavuus EV: (Laittevaihtelu) EV = R * K1 = 0,0038 * 3,05 EV = 0,012 mm							Mitaukset									
							Koe		2		3		EV% = EV * 100 / TOL			
							<1		4,56		3,05		0,0116 * 100 / 0,029			
							Tarkista tämä kohta									
							= 40,0 %									
Uusittavuus AV:																
AV = sqrt ((Xero * K2) ^ 2 - ((EV) / (n * r (Xero * K2) ^ 2 = 0,0007 (EV)^2 / (n * r) = 0,0001 AV = 0,008 mm							Hank.		2		3		AV% = AV * 100 / TOL			
							<2		3,65		2,7		0,0079 * 100 / 0,029			
							= 27,3 %									
Toistettavuus ja uusittavuus RR:																
RR = EV + AV = 0,0116 + 0,0079 RR = 0,014 mm							RR%		RR		* 100		/ TOL			
							0,014		*		100		/ 0,029			
							= 48,4 %									

LIITE 6*Ylärunko*

LIITE 7

Alarunko (suurempi)



Alarunko (pienempi)

